



INTÉZMÉNYI TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

2023. november 22.

**MEGÚJULÓ ENERGIA ELŐÁLLÍTÁSÁRA ÉS IDŐSZAKOS
TÁROLÁSÁRA ALKALMAS MOBIL PLATFORM
TERVEZÉSE**

**Design of a mobile platform suitable for production and periodic storage of
renewable energy**

Készítette: **Rátkai Márton**
UI1GWP
Gépészmérnöki mesterképzés
nappali tagozat
Szent István Campus

Témavezető: Dr. Oldal István, egyetemi docens,
MATE Műszaki Intézet

Lehetséges OTDK szekció: Műszaki Tudományi szekció

**Gödöllő
2023.**

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Irodalmi áttekintés.....	4
2.1. Napelemek	4
2.2. Hidrogén előállítása	4
2.3. Hidrogén tárolása.....	6
2.4. Biogáz-előállítás.....	7
2.5. Biogáztárolás	8
2.6. Biogáz és hidrogén alkotta gázkeverékek	8
2.7. Gázmotorok.....	9
2.8. Tüzelőanyag-cellák.....	9
3. Anyag és módszer	10
3.1. Az első változat	10
3.2. A második változat.....	15
3.3. A harmadik változat	16
3.4. A negyedik változat	17
3.5. Az ötödik változat	20
4. Eredmények.....	21
4.1. Kialakítás és energetikai számítások	21
4.1.1. <i>Az első változat</i>	21
4.1.2. <i>A második változat</i>	30
4.1.3. <i>A harmadik változat</i>	35
4.1.4. <i>A negyedik változat</i>	38
4.1.5. <i>Az ötödik változat</i>	45
4.2. Gazdasági számítások.....	49
4.3. A végleges változatok.....	49
4.4. Következtetések levonása	51
5. Összefoglalás.....	57
Irodalomjegyzék.....	58

1. Bevezetés

Korunk egyik legnagyobb problémája a folyamatosan növekvő energiaigény és annak kielégítése. Ez a folyamat az első és második ipari forradalmakat követően alakult ki, és az azóta is rendületlen tartó technológiai fejlődés, az állandó gazdasági növekedés igénye és a népességnövekedés erősíti. Az emberiség ezt az energiát elsősorban fosszilis tüzelőanyagok elégetésével nyerte, és nyeri ma is. Ez előreláthatólag még jó ideig így lesz, az alternatív energiaforrások térnyerése ellenére is.

Fosszilis és fosszilis energiaforrás között is van azonban különbség. A hidrogén és a biogáz például jóval kisebb környezeti terhelést okoznak, amely szempont a környezetszennyezés mértéke és az ezzel alighanem összefüggő éghajlatváltozás miatt fontosabb, mint valaha. Emellett az energiaárak folyamatos növekedése egyre inkább előtérbe helyezi az energiatakarékosságot, az alternatív, megújuló források alkalmazását és a decentralizált energiatermelést. A megújuló források nagyrészenek, mint a napenergia, legnagyobb problémája azonban, hogy gyakran nem akkor áll rendelkezésre, amikor szükségünk van rá. Ezt csak az energia tárolásával lehet kiküszöbölni, ami villamos energia esetén nem egyszerű feladat.

Dolgozatom célja egy olyan energiatermelő és -tároló berendezés lehetőségének vizsgálata, amely napelemek segítségével hidrogént állít elő. Ezt tárolás után önmagában vagy biogázzal keverve felhasználva villamos energia állítható elő egy mobil, konténerizált kialakítás keretében. Ezáltal képesek vagyunk a napenergiát tárolni, és tetszőleges időpontban felhasználni. A témához kapcsolódó irodalom-feldolgozást követően öt változattal foglalkozom, melynek során elsősorban a különböző megvalósítási lehetőségek energetikai vizsgálatára és összehasonlítására, illetve az ehhez kapcsolódó gazdasági számításokra koncentrálok.

2. Irodalmi áttekintés

Ebben a fejezetben a berendezés felépítéséhez és működéséhez kapcsolódó irodalom feldolgozását végzem, kezdve a napelemektől, a hidrogén és a biogáz előállításán és tárolásán át, a gáz formájában tárolt energia villamos energiává alakításáig.

2.1. Napelemek

A napelemek olyan szilárdtest berendezések, melyek a fénysugárzás energiáját közvetlenül alakítják egyenáramú villamos energiává. Az átalakítás alapját az jelenti, hogy a fény, amikor elnyelődik, mozgásképes töltött részecskéket hoz létre, amiket a berendezésben az elektrokémiai potenciálok és az elektron kilépési munkák különbözőségéből következő beépített elektromos tér rendezett mozgásra kényszerít. Több különböző fotovillamos elem létezik, a legelterjedtebb a szilícium félvezetős. A napelem fényt alakít villamos energiává, ami egy jellemzően három lépésből álló folyamat. Az első a fényelnyelés, melynek hatására az elektronok gerjesztett állapotba kerülnek. A második a pozitív és a negatív töltések lokális szétválasztása. A harmadik lépés pedig a töltések külső áramkörbe vezetése (Horváth 2011, Jin et al. 2023). A napelemgyártás kétféle technológiával történik, ezért alapvetően kétfajta tudunk megkülönböztetni. Az egyik a szelet vagy kristályos technológia, a másik a vékonyréteg technológia (Kasza 2009, Govindasamy, Kumar 2023).

Az energia tárolásának egyik lehetséges módja, ha a napelem által előállított villamos energiát víz elektrolízisére használjuk fel. Az így keletkező hidrogént elraktározva is megvalósítható az energiatárolás.

2.2. Hidrogén előállítása

A hidrogén a legkönnyebb elem. Mind fűtőértéke, mind égéshője nagy, széles koncentrációs tartományban éghető és robbanóképes gáz. Fontos tulajdonsága még, hogy gyorsan diffundálódik és keveredik. Annak ellenére, hogy az univerzum egyik leggyakoribb eleme, a Földön szabadon nem, csak vegyületeiben fordul elő nagy mennyiségben. A hidrogént elő lehet állítani a vegyületeiből, különböző eljárásokkal, energia befektetésével (Bölkény, Vadászi 2020). A hidrogén a jövő energiahordozója lehet, leginkább akkor, ha megújuló forrásból származó villamos energiát használnak előállítására, azonban jelenleg más előállítási módoknak is van még létjogosultsága. Az előállítási módszer nem befolyásolja a gáz kémiai tulajdonságait, ezek minden esetben ugyanazok.

2.2.1. Hidrogénelőállítási lehetőségek

Mivel a hidrogén a természetben csak kémiaiilag kötött formában, vegyületekben jelenik meg, hidrogénben gazdag alapanyagokból kell azt leválasztani. Ez minden esetben energiát igényel. Ezek a források lehetnek a földgáz, különféle egyéb szénhidrogének, a biomassa, a víz, mint az egyik legfontosabb, és egyéb hidrogéntartalmú vegyületek. Ezt követően villamos, kémiai vagy termikus energia felhasználása során ezen anyagokat összetevőikre választjuk szét, így nyerve tiszta hidrogéngázt.

2.2.1.1. Elektrolízis

Az elektrolízis elve viszonylag egyszerű. A folyamat során a vizet villamos áram felhasználásával hidrogénné és oxigénné bontják le. Az elektrolízishez használt elektrolizátor egy egyenáramú forrásból és két nemesfémme bevont elektródából áll, amelyeket egy elektrolit választ el egymástól. Elektrolízis fajták az alacsony hőmérsékleten végzett elektrolízis (LTE), a magas hőmérsékleten végzett elektrolízis (HTE), az alkáli elektrolízis (AE), és a protoncserélő membrán elektrolízis (PEM) (Lymberopoulos et al. 2004). Legegyszerűbb formájában az elektrolizátor tartalmaz egy negatív töltésű katódot, egy pozitív töltésű anódot és egy membránt. A teljes rendszerhez tartoznak még szivattyúk, szellőzőnyílások, tárolótartályok, áramforrás, szeparátor és egyéb komponensek. Az áram az anódon és a katódon keresztül a protoncserélő membránon (PEM) át folyik, és a vizet alkotórészeire, azaz hidrogénre és oxigénre bontja. A hidrogénmolekulákat felfogják és összegyűjtik (Kumar, Lim 2022; Klose et al. 2023).

2.2.1.2. Gőzreformálás

Jelenleg a hidrogénüzemanyag-előállítás 95%-a származik a hagyományos, fosszilis tüzelőanyagokból, a gőzreformáló, elgázosítási és részleges oxidációs technológiákból. Ezeknek a technológiáknak különféle kihívásai vannak, mint például a teljes energiafogyasztás és a környezetbe jutó szén-dioxid-kibocsátás továbbra is magas értéke. A napjainkban előállított hidrogén 48%-át még mindig a hagyományos módszerrel, a földgáz gőzzel történő reformálásával állítják elő (Karpilov, Pashchenko 2023; TÜV Rheinland 2023a).

2.2.1.3 Metán pirolízis

A metán pirolízis egy alapjában véve új technológia, amelynek lényege, hogy a földgázt egy nagy hőmérsékletű reaktorban közvetlenül szilárd szénre és hidrogénre bontják. Ehhez képest ez a módszer viszonylag kevés energiát igényel. A keletkező, szilárd formában kötött szén ezután ipari szinten tovább hasznosítható. Az eljárás során biomasszát is fel lehet használni. Ha a folyamat megújuló forrásból származó villamos energia segítségével zajlik, egyáltalán nem keletkezik üvegházhatású gáz (Herrera et al. 2023; TÜV Rheinland 2023a).

Az előállított hidrogén gyakran nem kerül azonnal felhasználásra, ezért nagyon fontos kérdés, hogy milyen lehetőségek állnak rendelkezésre a gáz tárolásához.

2.3. Hidrogén tárolása

A hidrogén hosszú ideig történő, tiszta, molekuláris formában való tárolása gáz- vagy folyadék fázisban oldható meg. Jelenleg az ipar elsősorban ezt a két tárolási lehetőséget alkalmazza (Dobránszky et al. 2022). Emellett lehetőség van a gáz kémiaiilag kötött formában való tárolására is.

2.3.1. A sűrített hidrogéngáz tárolása

A gáz-halmazállapotú hidrogént (CGH₂: sűrített gáz halmazállapotú hidrogén) olyan nyomástartó hidrogéntartályokban sűrítik és tárolják, amelyeknek hatalmas nyomást kell elviselniük. Mivel a tárolási nyomás korlátozott, a rendelkezésre álló hidrogéntárolási sűrűségek is korlátozottak. 100 bar nyomáson és 20°C hőmérsékleten a hidrogéngáz sűrűsége nagyjából 7,8kg/m³. Ekkora nyomáson és hőmérsékleten a hidrogén kompresszibilitási tényezője 1,0613 (Breeze 2018). A viszonylag kis tárolási sűrűség nagy tárolási térfogatot és ezáltal nagy beruházási költséget jelent. Az alacsonyabb tárolási nyomás azonban egyszerűbb tömítési rendszereket és így mérsékeltebb üzemeltetési költségeket okoz. Az igazán nagy nyomásokon (700 bar) alkalmazott tartályok korszerű, kompozit anyagok alkalmazásával készülnek, beruházási költségük magas, ezért föld feletti, telepített tárolási feladatokra kevésbé alkalmazzák őket (Dobránszky et al. 2022, TÜV Rheinland 2023b).

2.3.2. A cseppfolyós hidrogén tárolása

A nyomás növelése mellett lehetőség van a tiszta hidrogén sűrűségének cseppfolyósítással (kondenzációval) történő növelésére is. Ennek előnye, hogy hatalmas hidrogéntárolási sűrűség érhető el légköri nyomáson (LH₂: folyékony hidrogén). Ez a tárolási mód nagyobb

gázmennyiségek esetén alacsonyabb költségű, emiatt nagy távolságokra történő, hálózaton kívüli szállításnál alkalmazzák. Egyik hátrányos tulajdonsága, hogy a folyékony hidrogén, ha felmelegszik, elpárologhat, ez az úgynevezett párolgási veszteség. Emiatt állandó hűtés szükséges. A telített, cseppfolyósított hidrogén sűrűsége 1 bar nyomáson 70 kg/m^3 . A cseppfolyósított hidrogén tárolásának legfőbb problémája a cseppfolyósítási folyamat, amelynek energiaigénye jelentős. (Dobránszky et al. 2022, TÜV Rheinland 2023b).

2.3.3. Hidrogéngáz kémiaiilag kötött formában való tárolása

A nyomás vagy a hőmérséklet fenntartásával kapcsolatos akadályok leküzdése más megoldások keresésére ösztönözte a kutatókat. Így alakították ki az úgynevezett hidrogénhordozókkal történő tárolást. Hidrogéntárolási formákként olyan technológiákat alkalmaznak, amelyek a hidrogénnek egy másik anyaghoz történő kémiai vagy fizikai kötésen alapszanak (Arlt et al. 2012). Itt a szilárd halmazállapotban történő tárolást, amelynél a tároló anyag tömege relatíve nagy a tárolt hidrogén mennyiségéhez képest (Dong et al. 2023b), a folyékony szerves energiahordozókat és a metángázzá alakítást érdemes megemlíteni.

A hidrogén előállításának és tárolásának irodalmi áttekintése után a dolgozat másik sarokkövéről, a biogázzal, illetve annak előállításáról szeretnék írni.

2.4. Biogáz-előállítás

Biogáz a növénytermesztési fő-, továbbá az állattenyésztési és növénytermesztési eredetű melléktermékekből, különböző hulladékokból álló biomasszából, anaerob erjedéssel képződik. A biogáz, hasonlóan a földgázhoz, rendkívül sokféleképpen használható fel, Egyik lehetőség a szikragyújtású gázmotorokban való felhasználás, amely során hő- és villamos energia állítható elő. A biogáz sok helyen természetes körülmények között is képződik. A biogáz különböző szerves, megújuló anyagok oxigéntől nem tökéletesen elzárt erjedésének eredményeként, baktériumok segítségével jön létre (Anand et al. 2023). A biogáz igazából nem más, mint a természetes, szerves anyagokban szén formájában tárolt napenergia egy részének közvetett úton történő átalakítása anaerob fermentáció által gáz halmazállapotú energiahordozóvá. A biogázgyártás időtartama igen széles határok között mozog, ezért a gyártástechnológia tipizálása nem könnyű feladat (Nagy 2010). Az anaerob erjesztés a metánbaktériumok életműködése. A metanogén baktériumok kizárólag olyan helyen fejtik ki tevékenységüket, ahol oxigén már nincsen. Termelésük hatékonysága, sebessége, eredménye attól függ, hogy mennyiben sikerül ezen baktériumoknak kedvező életfeltételeket kialakítani.

A baktériumokat leginkább azon hőmérséklet-tartományok szerint csoportosítjuk, melyek életműködéseikre a legerősebb hatást fejtik ki:

- a pszichrofil baktériumok környezeti hőmérsékleten dolgoznak;
- a mezofil baktériumok a 30°C és a 37°C közti hőmérsékletet szeretik;
- a termofil baktériumok kizárólag 40°C fölött élnek meg és anyagcseréjük 50°C és 60°C között a legaktívabb (Galyas, Szunyog 2018).

A legmegfelelőbb alkalmazható biogáz előállítási eljárást a helyi lehetőségek és adottságok összessége, valamint a keletkező, illetve a rendelkezésre álló alapanyagok mennyiségi és minőségi jellemzői határozzák meg. A gyakorlatban alkalmazott biogáz-előállítási technológiák sokfélék lehetnek. Ugyanez elmondható a biogáztárolásról is, amelyre szintén több lehetőség létezik.

2.5. Biogáztárolás

A megfelelő biogáztároló-rendszer kiválasztása jelentősen hozzájárul a biogáz üzem hatékony és biztonságos működéséhez. A biogáztároló-rendszereknek két fő változata létezik. A belső biogáztartályok az anaerob rothasztóba vannak beépítve, míg a külső biogáztartályok attól el vannak választva, és a biogázüzem önálló alkotóelemeit alkotják. A biogáz helyi alkalmazására és közbenső tárolására szolgáló legegyszerűbb és legolcsóbb tárolórendszerek az alacsony nyomású rendszerek. A közepes és nagynyomású tárolórendszerek energia-, biztonsági és tisztítási igényei költséges és több karbantartást igénylő lehetőségeket jelentenek. Ezek a többletköltségek elsősorban biometán-előállításnál lehetnek indokoltak, amely magasabb energiatartalmú, ezért értékesebb tüzelőanyag, mint a biogáz (BioEnergy Consult 2021).

Ha rendelkezésünkre áll biogáz és hidrogén is, lehetőségünk van a két gázból előállított keverék alkalmazására is.

2.6. Biogáz és hidrogén alkotta gázkeverékek

A biogáz fűtőértékét a metán adja, a többi gáz az inerttartalom. Ennélfogva, minél nagyobb a biogáz metántartalma, annál értékesebb energiaforrás. A magas szén-dioxid tartalom megnehezíti az égési folyamatot, gátolja a lángstabilitást (Amez et al. 2021). Így a hidrogén hozzákeverése nemcsak hasznos, de lényegében szükséges is, ha a biogázt további

feldolgozás, tisztítás nélkül akarjuk felhasználni. Amez et al. (2021) szerint az ideális hidrogén-biogáz keverési arány hagyományos, gáztüzelésű berendezésekben való felhasználáshoz 5% hidrogén és 95% biogáz, a biogáz összetételétől függetlenül. Itt fontosnak tartom megjegyezni, hogy minden, a szövegben szereplő, a gázok összetételére vonatkozó százalékos érték tömegszázalékot jelent.

Amint előállt a szükséges gázkeverék, semmi akadálya ennek gázmotorokban történő elégetésének, és így energia termelésének.

2.7. Gázmotorok

A villamosenergia-igény nagy részét generátorok elégítik ki, melyek hajtását sokféleképpen meg lehet oldani. Ennek egyik lehetséges módja a gázmotor használata. Az ily módon történő villamosenergia-termelést lehetővé tevő berendezés a gázmotoros kiserőmű, amelyet röviden gázmotornak is szoktak nevezni (Szauter 2009). A berendezés fő egységei a motorblokk (amely a dugattyús, gázüzemű belső égésű motor, a tulajdonképpeni gázmotor), a generátor és a vezérlés (Dong et al. 2023a).

Az energiatermelő és -tároló berendezés megvalósítható tisztán hidrogénnel, biogáz használata nélkül is. Ekkor a hidrogént tüzelőanyag-cella segítségével alakítjuk villamos energiává.

2.8. Tüzelőanyag-cellák

Az üzemanyagcella a hidrogén vagy más tüzelőanyagok kémiai energiáját használja fel a tiszta és hatékony villamos energia előállítására. Ha hidrogén a tüzelőanyag, csak elektromosság, víz és hő (Han et al. 2023; Güllow, Schulze 2008). A tüzelőanyag-cellák alkalmazási lehetőségei igen széleskörűek, tekintve a tüzelőanyagok széles skáláját, valamint a nagy rendelkezésre álló mérettartományt. Egyik legfontosabb előnyük a hagyományos hőerőgépekkel szemben a jóval magasabb hatásfok (DOE 2023). A hidrogént használó üzemanyagcellák többfélék lehetnek. A legfontosabbak az alkálikus, a protoncserélő-membrános és a szilárd-oxidos típusok (MHT 2023).

3. Anyag és módszer

A dolgozat tárgya egy olyan hordozható energiatermelő és -tároló berendezés különböző változatainak összehasonlítása, amely napenergia felhasználásával állít elő hidrogént, majd ezt tárolja, amíg a felhasználására igény nincsen. A hidrogén előállítása víz elektrolízisével történik, mivel ez a legkörnyezetbarátabb és az adott keretek között a leginkább megvalósítható. Tárolása gázhalmazállapotban, tartályokban valósul meg, ugyanis ez a legegyszerűbb lehetőség és elegendő tárolókapacitást biztosít. Amint szükség van rá, a hidrogént biogázzal keverve előállított gázelegy egy gázmotorban elégethető, amellyel egy generátort működtetve villamos energia nyerhető. Másik lehetőség, hogy a hidrogénből biogáz nélkül, üzemanyagcellák segítségével állítunk elő villamos energiát. Mindegyik változatra igaz, hogy a berendezés lehetőleg a piacon elérhető legelterjedtebb egységekből összeállítható kell legyen. Az alábbiakban az öt változat leírása, valamint az energetikai és gazdasági számítások alapját képező adatok következnek.

3.1. Az első változat

Először egy olyan gázkeverékes lehetőséget vizsgálok meg, amely csak hidrogén-előállítást és hidrogéntárolást végez, tehát a biogáz más forrásból biztosítandó.

Első lépésként kiválasztottam egy olyan méretű konténert, amelyben és amelyen a berendezéshez szükséges egységek elhelyezhetők, és amely közúton szállítható. Ebből következően egy ISO szabvány szerinti, negyven lábas, magasított kivitelű konténerre esett (1. ábra) a választás (Konténer Hungária Kft. 2023). Ennek jellemzőit mutatja az 1. táblázat. Egy ilyen konténer 1968500 Ft-os áron már elérhető (Térmester 2023a).

1. táblázat ISO szabvány szerinti, 40 lábas, magasított konténer adatai

Hosszúság [mm]	Szélesség [mm]	Magasság [mm]	Rakfelület [m ²]	Térfogat [m ³]	Terhelhetőség [t (t/m ²)]
12192	2438	2896	29,72	86,08	50 (1,7)

2. táblázat A napelemek versenyeztetése a 40 lábas konténernél

	Darab	Darab ár	Teljes ár (4)	Csúcstelje sítmény	Összcsúcstel jesítmény (5)	Tömeg	Össz tömeg (2)	Összpont szám
Elmark 98SOL5 10M (Elektro bagoly 2023a)	14 db	124734 Ft/db	1746276 Ft (2)	510 W/db	7140 W (5)	22 kg/db	308 kg (5)	43
Austa AU550- 36-MHB (Elektro bagoly 2023b)	12 db	124384 Ft/db	1492608 Ft (3)	550 W/db	6600 W (3)	28,4 kg/db	340,8 kg (4)	35
V-TAC GV1135 3 (GOLED 2023)	14 db	58900 Ft/db	824600 Ft (5)	450 W/db	6300 W (2)	22 kg/db	308 kg (5)	40

A választott napelem tehát az Elmark 98SOL510M típusú monokristályos, félcellás technológiájú panel (2. ábra), amelynek csúcsteljesítménye 510 W. Hossza 2094 mm, szélessége 1134 mm. Egy napelempanel tömege 22 kg, ára 124734 Ft (Elektrobagoly 2023a).



2. ábra Elmark napelem (Elektrobagoly 2023a)

A következő lépés az elektrolizáló kiválasztása, amelynél a legfőbb szempont, hogy névleges termelési teljesítménye és az ehhez kapcsolódó energiafelhasználása a lehető legközelebb legyen a napelemek által biztosítani képes energiához. Ennélfogva a konténerbe kerülő elektrolizáló egy 1,65 kW teljesítményű Nel PEM S10-es (3. ábra), amely legfeljebb 0,27 (N)m³ hidrogént tud óránként előállítani, 6,1 kWh/(N)m³ energiafogyasztás mellett. Ez 0,024 kg/h-ás termelési volument jelent. 1 kg gáz előállítása pedig 67,8 kWh energiát igényel. A berendezés 0,8 méter széles, 1 méter hosszú és 1,1 méter magas. Egy ilyen PEM elektrolizáló ára 2392 USD, amely nagyjából 815000 Ft-nak felel meg (Nel 2023, Keen 2023).



3. ábra Nel PEM S10 elektrolizáló (Nel 2023)

A hidrogén tárolására Mahytec (2023) 850 literes, kompozit tartályokat választottam (4. ábra), mivel ezek felelnek meg leginkább a konténer által megszabott kereteknek. Egy ilyen 4,2 kg gázt tud tárolni, 60 bar nyomáson. Egy elektrolizálóval összekapcsolva a keletkezett hidrogén

közvetlenül tárolható. A szükséges nyomás előállítását biztosító kompresszor energiaellátása a külső forrásból származó biogáz segítségével biztosítható. Üresen egy darab tároló 215 kg tömegű. A tartály függőleges és vízszintes helyzetben is elhelyezhető. Átmérője 840 mm, hossza 1870 mm. Ára 1200 USD, amely nagyjából 408000 Ft-nak felel meg.



4. ábra 850 literes hidrogéntartályok (Mahytec 2023)

A berendezés egyik legnagyobb előnye, hogy olyan helyeken is elérhetővé teszi a villamos energiát, amelyek a hálózattól messze esnek. Mivel elsősorban magyarországi, illetve európai felhasználásban gondolkodok, és mert a most vizsgált változatnál a biogázt külső forrásból kell biztosítani, mezőgazdasági eredetű biogázzal számolok. Ezt, általános esetben, Galyas és Szunyog (2018) szerint, a következő összetétel jellemzi: 65% metán, 34% szén-dioxid, 1% nitrogén.

A rendelkezésre álló hidrogénből és biogázból gázelegyet állítunk elő. Az ideális biogáz-hidrogén gázkeverék 5% hidrogént és 95% biogázt tartalmaz, a biogáz összetételétől függetlenül (Amez et al. 2021).

Ezt a keveréket gázmotorban elégetve állítunk elő villamos energiát. Az egység kiválasztásánál a legfontosabb szempont a konténerben rendelkezésre álló hely volt, valamint az, hogy névleges teljesítménye haladja meg a rendszer által előállított gázelegy teljesítményének százszorosát, de ne haladja meg annak háromezredszorosát. Ezek alapján a választott gázmotoros kiserőmű (gázmotor és generátor) egy 397 kW-os, Caterpillar gyártmányú G3406 NA típusú földgázmotoros áramfejlesztő (5. ábra). Ára 2788000 Ft. Hossza 2896 mm, szélessége 1051 mm, magassága 1433 mm, tömege 2088 kg. Névleges teljesítményen üzemeltetve 125 kW villamos teljesítmény leadására képes. Villamos

hatásfoka 31,5% (Huntraco 2023). Itt fontosnak tartom megjegyezni, hogy a gép termikus hatásfoka 57,4%, tehát kapcsolt energiatermelésben használva az összhatéffok 88,9%. Ennélfogva mindenképpen érdemes a pusztán villamosenergia-termelés mellett a hő hasznosítását is megvalósítani, amennyiben erre van lehetőség. Ennek valószínűsége nagy, hiszen melegvíz-szükséglet szinte mindenhol jelentkezik.



5. ábra A gázmotoros kiserőmű (Huntraco 2023)

3.2. A második változat

Az alábbiakban egy olyan konstrukciót fogok megvizsgálni, ami az előzőhöz hasonló, de a biogázt is a konténerben állítjuk elő, és ott is tároljuk azt.

A tároló, a napelemek, az elektrolizáló és a gázmotoros kiserőmű változatlanok maradnak. A hidrogéntartályok is ugyan olyanok, csak a számuk lesz kevesebb, mivel szükség van a biogáz-előállító és a biogáztároló, valamint a kompresszor elhelyezésére is.

Biogáz-előállító-berendezés a rendelkezésre álló mérettartományban a piacon nem érhető el, így azt egyedileg kell előállítani. Itt a következő szempontokat kell figyelembe venni. Ahhoz, hogy a gáz előállítása ne igényeljen külön bevezetett energiát pszichrofil eljárás alkalmazására van szükség. Utóbbi azt jelenti, hogy a biogázképződés környezeti hőmérsékleten történik, nem kell az erjesztőt fűteni. Ez egy viszonylag lassú folyamat, akár 80 napig is eltarthat (Galyas, Szunyog 2018). Emiatt az első üzembe helyezés alkalmával 80 nap elteltével lesz csak biogázunk. Ha ebben az időszakban már szeretnénk hidrogént előállítani, akkor a hidrogéntárolóknak legalább a 80 nap alatt előállított hidrogénmennyiség tárolására alkalmasnak kell lenniük. Ez a feltétel nem kell, hogy teljesüljön, ha az elektrolizálót ekkor még nem működtetjük. Az előkészített szubsztrátum folyamatos adagolásával megvalósítható a biogáz folyamatos előállítása, azaz ennek a kezdeti időszaknak

a letelte után a gáztermelés folyamatossá válik, ezáltal a gázkeverékhez szükséges biogáz és hidrogén állandóan, megfelelő arányban előállítható lesz. Magyarországon a leggyakoribb a hígtrágyából előállított biogáz, ami egyébként a legjobb biogáz alapanyag. Ez szarvasmarha- vagy sertéshígtrágya lehet, amelyek minőségében a biogáztermelés szempontjából lényeges különbség nincs. A berendezés alkalmazását ennél fogva elsősorban az olyan mezőgazdasági vállalkozások környezetében képzelem el, ahol adott a megfelelő állatállomány a hígtrágya alapanyag biztosításához. Ebből következően a számítások során figyelembe veszem az ehhez kapcsolódó európai és magyarországi viszonyokat.

A biogáz tárolására szükségünk van tartályokra. A választásom a Cimc Honto 1000 literes, vízszintes elhelyezésű nyomástartó edényére esett (6. ábra), mivel a konténer méreteit figyelembe véve ez helyezhető el benne a legjobban. Egy ilyen tartály tömege üresen 280 kg. Magassága 920 mm, átmérője 761 mm, hossza pedig 2400 mm. Ára 8000 USD, ami körülbelül 2720000 Ft-nak felel meg. A gázt 17,24 bar nyomáson tárolja. (Cimc Honto 2023).



6. ábra A biogázt tároló tartály (Cimc Honto 2023)

3.3. A harmadik változat

Ez a változat az elsőtől abban különbözik, hogy nem használunk biogázt, kizárólag hidrogén formájában tároljuk az energiát. Ezáltal a gázmotoros kiserőmű helyett hidrogén-tüzelőanyagcellát alkalmazva állítunk elő villamos energiát.

A konténer, a napelemek, az elektrolizáló és a tartályok megegyeznek az első változatnál használtakkal. A különbség a gázmotor lecserélése üzemanyagcellára. A kiválasztásnál fontos szerepet játszott, hogy a cella névleges, felvett teljesítménye haladja meg a rendszer által előállított hidrogéngáz teljesítményének százszorosát, de ne haladja meg annak háromszázszorosát. Ennek megfelelően a választott berendezés egy protoncserélő-membrános

Hyfindr (2023) T505 típusú, legfeljebb 50 kW villamos teljesítmény előállítására képes tüzelőanyag-cella (7. ábra), amelynek hatásfoka 54%. Használható -30 és +50°C közötti környezeti hőmérséklet mellett. Ára 4300 USD, amely nagyjából 1462000 Ft-nak felel meg. Hossza 939 mm, szélessége 511 mm, magassága 545 mm, tömege pedig 135 kg.



7. ábra A választott tüzelőanyag-cella (Hyfindr 2023)

Ez a kivitel abból a szempontból előnyösebb, mint a biogázt is használó változatok, hogy szinte bárhol alkalmazható, hiszen működéséhez csak a vizet kell külön biztosítani.

3.4. A negyedik változat

Ennél a változatnál egy kisebb méretű kialakítást vizsgállok meg. A rendelkezésre álló hely jóval kevesebb, a biogáz konténerben történő előállítása így nem jöhet szóba. Ennélfogva ez a változat hasonlít az elsőhöz, azaz a hidrogént a konténerben termeljük és tároljuk, a biogázt pedig külső forrásból biztosítjuk, azonban itt egy kisebb konténert használunk. Ez egy szabványos, húsz láb hosszú, magasított kivitelű tároló (8. ábra), melynek jellemzőit a 3. táblázat tartalmazza (Konténer Hungária Kft. 2023). Egy ilyen konténer 1250000 Ft-os áron már elérhető (Térmester 2023b).

3. táblázat ISO szabvány szerinti, 20 lábas, magasított konténer adatai

Hosszúság [mm]	Szélesség [mm]	Magasság [mm]	Rakfelület [m ²]	Térfogat [m ³]	Terhelhetőség [t (t/m ²)]
6058	2438	2896	14,77	42,77	25 (1,7)



8. ábra Szabványos, magasított 20 lábas konténer (K-Tainer 2023)

Az elektrolizálónál és a kiserőműnél nincs különbség. A hidrogéntartályok is megegyeznek az első változatnál alkalmazottakkal, azonban ezek száma eltérhet.

A napelemeknél változik a helyzet. A konténer tetejére kerülnek, azonban a rendelkezésre álló felület csak 14,77 m². A megváltozott körülményeknek megfelelően elvégzem a versenyeztetést az első változatnál megismert módon (4. táblázat).

4. táblázat A napelemek versenyztetése a 20 lábas konténernél

	Darab	Darab ár	Teljes ár (4)	Csúcsstelje sítmény	Összcsúcsstel jesítmény (5)	Tömeg	Össz tömeg (2)	Összpont szám
Elmark 98SOL5 10M (Elektro bagoly 2023a)	6 db	124734 Ft/db	748404 Ft (2)	510 W/db	3060 W (4)	22 kg/db	132 kg (5)	38
Austa AU550- 36-MHB (Elektro bagoly 2023b)	6 db	124384 Ft/db	746304 Ft (2)	550 W/db	3300 W (5)	28,4 kg/db	170,4 kg (4)	41
V-TAC GV1135 3 (GOLED 2023)	6 db	58900 Ft/db	353400 Ft (5)	450 W/db	2700 W (2)	22 kg	132 kg (5)	40

A versenyztetés alapján, a legjobb helykihasználás és a lehető legtöbb teljesítmény elérése miatt a választott napelem az Austa AU550-36-MHB típusú monokristályos, félcellás technológiájú panel (9. ábra), amelynek csúcssteljesítménye 550 W. Hossza 2279 mm, szélessége 1134 mm. Egy napelempanel tömege 28,4 kg, ára 124384 Ft (Elektrobagoly 2023b).



9. ábra Austa napelem (Elektrobagoly 2023b)

3.5. Az ötödik változat

Az ötödik változat a hidrogén-üzemanyagcellás kisméretű változata. Ennek megfelelően a negyedik változatnál ismertetett húsz láb hosszúságú konténer tartalmazza a harmadik változat tüzelőanyag-celláját. A napelemeknél és az elektronizálónál nincs változás a negyedik változathoz képest, a hidrogéntartályok számában, a tárolókapacitás növelése érdekében, azonban lehet eltérés. Ezt a tüzelőanyag-cella gázmotoros kiserőműhöz képest kisebb mérete teszi lehetővé.

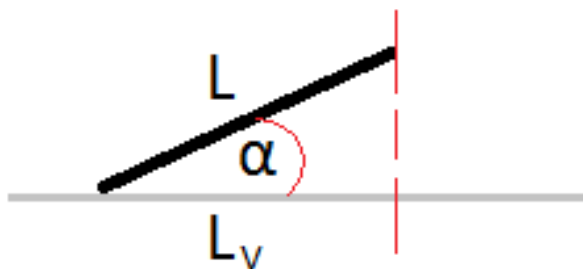
4. Eredmények

A következőkben az öt változat megvalósíthatóságát és hatékonyságát, gazdaságosságát fogom részletesen megvizsgálni. Mindegyiknél foglalkozom a napelemek konténeren történő elhelyezésével, az elektrolizáló, a tartályok, az energiaelőállító-egység tárolón belüli elhelyezésével. A fejezet tartalmazza továbbá munkám lényegét, a különböző megvalósítási lehetőségek energetikai és gazdasági vizsgálatát, valamint összehasonlítását, az ezekhez kapcsolódó részletes számításokkal együtt.

4.1. Kialakítás és energetikai számítások

4.1.1. Az első változat

A berendezés kereteit egy szabványos, negyven lábas, magasított kivitelű konténer adja. Ennek tetejére kerülnek a napelemek. Ideális esetben a napelem dőlésszöge 35 fok. A 10. ábra és a számítás alapján ez azt jelenti, hogy egy panel vetületi hossza:



10. ábra A napelem elhelyezkedése a konténer tetején

$$L_v = L \cdot \cos \alpha = 2094 \text{ mm} \cdot \cos 35^\circ = 1715,3 \text{ mm}$$

ahol:

- L_v a napelem vetületi hossza
- L a napelem hossza
- α a napelem dőlésszöge

A konténer szélessége 2438 mm, egy napelemé 1134 mm, így 2 sor napelem fér el a konténer tetején. Egy panel vetületi hossza 1715,3 mm, ami a konténer 12192 mm-es hosszúságát figyelembe véve 7 darab napelem elhelyezését teszi lehetővé egy sorban. A konténer méretei

alapján tehát 2 sorban 7-7, összesen 14 darab panel fér el. Egy panel tömege 22 kg, az össztömeg így 308 kg, ami nem haladja meg a konténer 50 tonnás teherbírását.

$$m_{\text{össz}} = m \cdot n = 22 \text{ kg} \cdot 14 = 308 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{\text{össz}}$ a napelemek össztömege
- m egy panel tömege
- n a napelemek darabszáma

Mivel egy darab 510 W-os, ezért ez 7,14 kW összcsúcsteljesítményt jelent.

$$P_{\text{össz}} = P \cdot n = 510 \text{ W} \cdot 14 = 7140 \text{ W} = 7,14 \text{ kW}$$

ahol:

- $P_{\text{össz}}$ az összcsúcsteljesítmény
- P egy darab panel csúcsteljesítménye
- n a napelemek darabszáma

Déli tájolású, árnyékoltságtól mentes, 1kW csúcsteljesítményű napelem, magyarországi viszonyok között, átlagosan 1100 kWh energiát termel egy év alatt (Innovatív Napelem 2023). Így a teljes rendszer évi 7854 kWh-t tud előállítani.

$$W_{\text{össz}} = P_{\text{össz}} \cdot 1100 \text{ kWh} = 7,14 \cdot 1100 \text{ kWh} = 7854 \text{ kWh}$$

ahol:

- $W_{\text{össz}}$ a rendszer által egy év alatt előállított energia
- $P_{\text{össz}}$ az összcsúcsteljesítmény (dimenzió nélkül)

Ezt az energiát használjuk fel hidrogén-előállításra. Egy év alatt az elektrolizáló 115,84 kg gázt tud előállítani, amihez 1042,56 kg vízre van szükség. A víz külső forrásból biztosítandó.

$$m_H = \frac{W_{\text{össz}}}{W_{kg}} = \frac{7854 \text{ kWh}}{67,8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 115,84 \text{ kg}$$

ahol:

- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege
- $W_{\text{össz}}$ a rendszer által egy év alatt előállított energia
- W_{kg} egy kilogramm hidrogén előállításához szükséges energia

$$m_{\text{víz}} = m_H \cdot c = 115,84 \text{ kg} \cdot 9 = 1042,56 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{\text{víz}}$ az egy év alatt felhasznált víz tömege
- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege
- c konstans, amely a vízben található hidrogén és oxigén tömegarányától függ

Az elektrolizáló legfeljebb 0,024 kg hidrogént tud óránként előállítani. Ez egy év alatt 210,24 kg megtermelt gázt jelent. Mivel a napelemek csak 115,84 kg hidrogén előállításához elegendő energiát termelnek évente, ezért az elektrolizáló termelési kapacitása megfelel.

$$m_{EH} = M_h \cdot t_h = 0,024 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 365 \cdot 24 \text{ h} = 210,24 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{EH} az elektrolizáló által egy év alatt előállítani képes hidrogén tömege
- M_h az elektrolizáló által egy óra alatt előállítani képes hidrogén tömege
- t_h az egy évben lévő órák száma

A keletkező hidrogént tartályokban tároljuk. A konténer magassága 2896 mm, szélessége 2438 mm. Egy tartály átmérője 840 mm, magassága 1870 mm, így a tároló hossz tengelyére merőlegesen fektetve 3 tartály fér el egy oszlopban. A tároló 12192 mm-es hossza és a tartályok méretei alapján sorban 14 tartálynak jutna hely. A konténerben tehát, annak hossz tengelyére merőlegesen fektetve a nyomástartó edényeket, összesen 14, 3 darabból álló oszlop állítható össze, összesen 42 darab tartállyal. Ennyi elhelyezésére azonban valójában nincs lehetőség, és szükség sincsen rá.

Az egyik lehetőség, ha a gázmotor a konténeren kívül van. Ekkor nekünk elég 12 oszlop. Egyrészt szükség van az elektrolizáló elhelyezésére a konténerben, amelynek így több, mint 2

m hosszú hely áll rendelkezésre. Az elektrolizáló 0,8 méter széles, 1 méter hosszú és 1,1 méter magas, ezért a tárolóban kényelmesen elfér. Mellette a kompresszornak is marad elegendő hely. Másrészt a 36 tartály összesen 151,2 kg hidrogént tud tárolni, ami több, mint az egy év alatt megtermelhető mennyiség.

$$m_{tH\text{össz}} = m_{tH} \cdot n_t = 4,2 \text{ kg} \cdot 36 = 151,2 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{tH\text{össz}}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- m_{tH} egy tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- n_t tartályok száma

Egy üres tartály tömege 215 kg. Ha az összes tele van, az össztömeg még akkor is csak 7891,2 kg, amely messze elmarad a tároló 50 tonnás terhelhetőségétől.

$$m_{t\text{össz}} = (m_t + m_{tH}) \cdot n_t = (215 \text{ kg} + 4,2 \text{ kg}) \cdot 36 = 7891,2 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{t\text{össz}}$ a megtelt tartályok össztömege
- m_t egy tartály tömege üresen
- m_{tH} egy tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- n_t tartályok száma

A másik lehetőség, hogy a kiserőművet is a konténerben helyezzük el. Ekkor 10 oszlopba tudjuk behelyezni a tartályokat, összesen 30 darabot. A tartályok 8400 mm, a gázmotor 2896 mm, az elektrolizáló pedig 800 mm helyet foglal el a konténer hosszának irányában. Ez összesen 12096 mm, így mindennek éppen elegendő hely jut. A 30 tartály tömege, ha a maximális hidrogénmennyiséget tárolja 6576 kg.

$$m_{t\text{össz}} = (m_t + m_{tH}) \cdot n_t = (215 \text{ kg} + 4,2 \text{ kg}) \cdot 30 = 6576 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{t\text{össz}}$ a megtelt tartályok össztömege

- m_t egy tartály tömege üresen
- m_{tH} egy tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- n_t tartályok száma

Ehhez a kiserőmű 2088 kg-os tömegét hozzáadva könnyen belátható, hogy a konténer ebben az esetben is bírja a terhelést.

A tartályok összesen 126 kg hidrogént tudnak tárolni, amely még mindig meghaladja az egy teljes év alatt előállítható gáz mennyiségét.

$$m_{tHössz} = m_{tH} \cdot n_t = 4,2 \text{ kg} \cdot 30 = 126 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- m_{tH} egy tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- n_t tartályok száma

Ebből következően az energiatermelő rendszert ennél a változatnál mindenképpen érdemes úgy kialakítani, hogy a kiserőmű is a konténerben legyen. Ennek okai, hogy olcsóbb, könnyebben mozgatható és még így is hatalmas tárolókapacitás áll rendelkezésre.

A tárolt hidrogént, tetszőleges időpontban, biogázzal keverve gázkeveréket állítunk elő, amit gázmotorban elégetünk, ezáltal villamos energiát állítva elő. Így, végső soron, a hidrogén, illetve a gázkeverék tárolja a napelemek által termelt energiát, amelyet ezáltal akkor tudunk felhasználni, amikor erre szükség mutatkozik. A hidrogén fűtőértéke 120 MJ/kg (World Nuclear Association 2023). Az egy év alatt megtermelt gáz tehát $13900,8 \text{ MJ} = 3861,25 \text{ kWh}$ energiát tartalmaz.

$$E_{Hössz} = Q_H \cdot m_H = 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 115,84 \text{ kg} = 13900,8 \text{ MJ}$$

ahol:

- $E_{Hössz}$ az egy év alatt előállított hidrogén energiataralma
- Q_H a hidrogén fűtőértéke

- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege

A metán fűtőértéke 50 MJ/kg (World Nuclear Association 2023). A biogáz csak 65% metánt tartalmaz, így a fűtőérték 32,5 MJ/kg-ra csökken. A keverék 95%-a biogáz. Mivel egy év alatt 115,84 kg hidrogén keletkezik, az ehhez szükséges biogáz 2200,96 kg, amelyet külső forrásból kell biztosítani.

$$m_{bg} = m_H \cdot \frac{95}{5} = 115,84 \text{ kg} \cdot \frac{95}{5} = 2200,96 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{bg} az egy év alatt szükséges biogáz tömege
- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege

Ennek energiatartalma 71531,2 MJ=19869,78 kWh.

$$E_{bg\text{össz}} = 0,65 \cdot Q_{CH_4} \cdot m_{bg} = 0,65 \cdot 50 \frac{MJ}{kg} \cdot 2200,96 \text{ kg} = 71531,2 \text{ MJ}$$

ahol:

- $E_{bg\text{össz}}$ az egy év alatt felhasznált biogáz energiatartalma
- Q_{CH_4} a metán fűtőértéke
- m_{bg} az egy év alatt szükséges biogáz tömege

Így egy év alatt összesen 2316,8 kg gázelegyet állítunk elő, 85432 MJ=23731,11 kWh energiatartalommal.

$$m_{gáz} = m_H + m_{bg} = 115,84 \text{ kg} + 2200,96 \text{ kg} = 2316,8 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{gáz}$ az egy év alatt előállított gázkeverék tömege
- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege
- m_{bg} az egy év alatt szükséges biogáz tömege

$$E_{össz} = E_{Hössz} + E_{bgössz} = 13900,8 \text{ MJ} + 71531,2 \text{ MJ} = 85432 \text{ MJ}$$

ahol:

- $E_{\text{össz}}$ az egy év alatt előállított gázkeverék energiatartalma
- $E_{\text{Hössz}}$ az egy év alatt előállított hidrogén energiatartalma
- $E_{\text{bgössz}}$ az egy év alatt felhasznált biogáz energiatartalma

A gázmotor belépő teljesítménye 397 kW a legnagyobb, 125 kW villamos teljesítmény leadása esetén. A gázkeverék energiatartalmából kiszámítható, hogy teljesítménye 2709,03 W, azaz a rendszer 1 másodperc alatt átlagosan 2709,03 J energiát termel gázkeverék formájában.

$$P_{\text{gáz}} = \frac{E_{\text{össz}}}{t_s} = \frac{10^6 \cdot 85432 \text{ J}}{365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} = 2709,03 \text{ W}$$

ahol:

- $P_{\text{gáz}}$ a gázelegy teljesítménye
- $E_{\text{össz}}$ az egy év alatt előállított gázkeverék energiatartalma
- t_s az egy évben lévő másodpercek száma

A két teljesítményérték között nagy a különbség, azonban ez nem okoz problémát, hiszen a rendszer lényege elsősorban az, hogy a napenergiát, amikor abból többlet van, hidrogénként tárolja, amit később tetszőleges időpontban felhasználhatunk biogázzal keverve. Ahhoz, hogy a legnagyobb, 125 kW villamos teljesítményt 1 órán keresztül tudja a fogyasztóknak biztosítani a rendszer, hat napig kell az elektrolizálónak működnie, és a keletkező hidrogént mind a tartályokba kell gyűjteni. Ez a következő számításból látható:

$$d = \frac{E_{\text{bem}}}{P_{\text{gáz}}} = \frac{397 \text{ kWh}}{2,70903 \text{ kW}} = 146,55 \text{ h} = 6,1 \approx 6 \text{ nap}$$

ahol:

- d a napok száma
- E_{bem} a gázmotor energiaigénye a legnagyobb, 125 kW-os villamos teljesítmény leadása esetén

- $P_{gáz}$ a gázelegy teljesítménye

A következőben azt vizsgálom meg, mennyi villamos energiát nyerünk, ha a hidrogént egy teljes napig elraktározzuk.

$$W_{1nap} = \eta_{vm} \cdot \frac{P_{gáz}}{1000} \cdot t_{1nap} = 0,315 \cdot \frac{2709,03 \text{ W}}{1000} \cdot 24 \text{ h} = 20,48 \text{ kWh} \approx 20,5 \text{ kWh}$$

ahol:

- W_{1nap} az egy napnyi raktározással nyerhető villamos energia
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $P_{gáz}$ a gázelegy teljesítménye
- t_{1nap} az egy napban lévő órák száma

A számításból következik, hogy egy napnyi raktározással összesen 20,5 kWh villamos energia nyerhető. Ez azt jelenti, hogy 1 nap tartalékolással 20,5 kW villamos teljesítményt tud a fogyasztók számára biztosítani az energiatermelő rendszer egy teljes órán keresztül.

Felmerül a kérdés, hogy a rendszer képes-e állandó energiaellátást is biztosítani? Az alábbi számítás alapján három átlagos magyarországi lakossági villamos fogyasztót lehet képes ellátni korlátlan ideig. Az éves fogyasztás 2022-ben 2392 kWh volt (MVM 2023a), azaz egy fogyasztó teljesítménye:

$$P_f = \frac{E_f}{t_h} = \frac{2392000 \text{ Wh}}{365 \cdot 24 \text{ h}} = 273,06 \text{ W}$$

ahol:

- P_f egy átlagos lakossági fogyasztó teljesítménye
- E_f egy átlagos lakossági fogyasztó villamosenergia-fogyasztása
- t_h az egy évben lévő órák száma

A rendszer teljesítményéből az ellátható fogyasztók száma:

$$n_f = \frac{\eta_{vm} \cdot P_{gáz}}{P_f} = \frac{0,315 \cdot 2709,03 \text{ W}}{273,06 \text{ W}} = 3,13 \approx 3$$

ahol:

- n_f a fogyasztók száma
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $P_{gáz}$ a gázelegy teljesítménye
- P_f egy átlagos lakossági fogyasztó teljesítménye

A probléma viszont az, hogy a gázmotor ilyen kis teljesítményen, a veszteségei miatt, nem üzemeltethető, ezért a valóságban az állandó energiaellátás a berendezéssel nem valósítható meg. Megoldást jelenthetne a problémára egy másik, kisebb gázmotor beépítése, így lehetőség lenne nagyobb és kisebb villamos teljesítmények biztosítására, akár az állandó energiaellátásra is. Ilyen kis teljesítményű gépet azonban nem forgalmaznak, az egyedi gyártás pedig jócskán megnövelné a költségeket.

Végül fontosnak tartom meghatározni a rendszer által tárolni képes legnagyobb villamosenergia-mennyiséget, ami a tárolható hidrogén mennyiségétől függ. Ez 126 kg. Ebből következően:

$$m_{bgmax} = m_{tHössz} \cdot \frac{95}{5} = 126 \text{ kg} \cdot \frac{95}{5} = 2394 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{bgmax} a legnagyobb tárolható hidrogénmennyiséghez szükséges biogáz tömege
- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege

$$m_{gkmax} = m_{tHössz} + m_{bgmax} = 126 \text{ kg} + 2394 \text{ kg} = 2520 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{gkmax} a legnagyobb gázkeverék-mennyiség tömege
- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- m_{bgmax} a legnagyobb tárolható hidrogénmennyiséghez szükséges biogáz tömege

$$W_{gkmax} = \eta_{vm} \cdot m_{gkmax} \cdot (0,05 \cdot Q_H + 0,95 \cdot 0,65 \cdot Q_{CH_4}) =$$

$$= 0,315 \cdot 2520 \text{ kg} \cdot \left(0,05 \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} + 0,95 \cdot 0,65 \cdot 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = 29271,4 \text{ MJ}$$

ahol:

- W_{gkmax} a tárolható legnagyobb villamosenergia-mennyiség
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- m_{gkmax} a legnagyobb gázkeverék-mennyiség tömege
- Q_H a hidrogén fűtőértéke
- Q_{CH_4} a metán fűtőértéke

A legnagyobb tárolható energiamennyiség tehát 29271,4 MJ, azaz 8130,9 kWh, amelyet a rendszer 397 nap alatt tud előállítani.

$$d_{Wgkmax} = \frac{m_{tHössz}}{m_H} \cdot t_d = \frac{126 \text{ kg}}{115,84 \text{ kg}} \cdot 365 = 397 \text{ nap}$$

ahol:

- d_{Wgkmax} a napok száma
- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege
- t_d az egy évben lévő napok száma

4.1.2. A második változat

A konténerre, a napelemekre és a hidrogén-előállításra vonatkozó számítások megegyeznek az első változat számításaival.

Ebből következően egy nap alatt 0,317 kg hidrogén állítható elő.

$$m_{H1nap} = \frac{m_H}{t_d} = \frac{115,84 \text{ kg}}{365} = 0,317 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{H1nap} az egy nap alatt előállítható hidrogén tömege

- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege
- t_d az egy évben lévő napok száma

A gázkeverék összetételéből adódóan ehhez napi 6,03 kg biogázt szükséges előállítani.

$$m_{bg1nap} = m_{H1nap} \cdot \frac{95}{5} = 0,317 \text{ kg} \cdot \frac{95}{5} = 6,03 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{bg1nap} az egy nap alatt szükséges biogáz tömege
- m_{H1nap} az egy nap alatt előállítható hidrogén tömege

A megtermelt gáz mennyisége a legrosszabb esetben 20 (N)m³ egy tonna szubsztrátumból (Galyas, Szunyog 2018). A biogáz összetételéből adódó sűrűsége 1,17 kg/(N)m³, amelyet az alábbi számítás mutat.

$$\begin{aligned} \rho_{bg} &= 0,65 \cdot \rho_{CH_4} + 0,34 \cdot \rho_{CO_2} + 0,01 \cdot \rho_{N_2} = \\ &= 0,65 \cdot 0,75 \frac{\text{kg}}{(\text{N})\text{m}^3} + 0,34 \cdot 1,98 \frac{\text{kg}}{(\text{N})\text{m}^3} + 0,01 \cdot 1,25 \frac{\text{kg}}{(\text{N})\text{m}^3} = 1,17 \frac{\text{kg}}{(\text{N})\text{m}^3} \end{aligned}$$

ahol:

- ρ_{bg} a biogáz sűrűsége
- ρ_{CH_4} a metán sűrűsége
- ρ_{CO_2} a szén-dioxid sűrűsége
- ρ_{N_2} a nitrogén sűrűsége

Ebből látható, hogy 1 tonna szubsztrátumból 23,4 kg biogáz állítható elő.

$$m_{bg1t} = \rho_{bg} \cdot V_{bg1t} = 1,17 \frac{\text{kg}}{(\text{N})\text{m}^3} \cdot 20 (\text{N})\text{m}^3 = 23,4 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{bg1t} az 1 tonna szubsztrátumból előállítható biogáz tömege
- ρ_{bg} a biogáz sűrűsége

- V_{bg1t} az 1 tonna szubsztrátumból előállítható biogáz térfogata

Mivel a gázkeverék napi 6,03 kg biogázt igényel, naponta 257,7 kg hígtrágyára van szükség. Ekkora mennyiségből állítható elő ekkora tömegű biogáz.

$$m_{t1nap} = \frac{m_{bg1nap}}{m_{bg1t}} \cdot 1000 = \frac{6,03 \text{ kg}}{23,4 \text{ kg}} \cdot 1000 \text{ kg} = 257,7 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{t1nap} a napi hígtrágya igény
- m_{bg1nap} az egy nap alatt szükséges biogáz tömege
- m_{bg1t} az 1 tonna szubsztrátumból előállítható biogáz tömege

Európában egy átlagos állattartó telep állománymérete 47 állategység (NAK 2023). Ez szarvasmarhánál átlagosan 80, sertésnél átlagosan 125 állatot jelent (Gazdavidág 2013). A kettő közül a sertés, az állat méreteiből adódóan, kevesebb trágyát termel a nagyobb darabszám ellenére is. Egy konkrét mezőgazdasági nagyüzemben egy 12270 fős sertésállomány napi 150 m³ hígtrágyát termel (VL 2009). Ez azt jelenti, hogy 125 egyed naponta 1,53 m³-t képes biztosítani.

$$V_{ts1nap} = \frac{n_s}{n_{sn}} \cdot V_{tn} = \frac{125}{12270} \cdot 150 \text{ m}^3 = 1,53 \text{ m}^3$$

ahol:

- V_{ts1nap} az n_s számú sertés által egy nap alatt előállított hígtrágya térfogata
- n_s az átlagos sertésállomány egyedszáma egy európai állattartó telepen
- n_{sn} egy konkrét nagyüzem sertésállományának egyedszáma
- V_{tn} az előbbi konkrét nagyüzem sertései által naponta előállított hígtrágya térfogata

A sertés hígtrágya átlagosan 1015 kg/m³ sűrűségű (González, Sánchez 2005), tehát egy nap 1553 kg hígtrágya keletkezik.

$$m_{ts1nap} = \rho_t \cdot V_{ts1nap} = 1015 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,53 \text{ m}^3 = 1553 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{ts1nap} az egy nap alatt keletkező hígtrágya tömege
- ρ_{bg} a biogáz sűrűsége
- V_{ts1nap} az n_s számú sertés által egy nap alatt előállított hígtrágya térfogata

Az előzőekből látható, hogy egy átlagos európai állattartó telepen még a legrosszabb esetben is bőven biztosítható a megfelelő trágyamennyiség a szükséges biogáz előállításához.

Az előállított biogázt tárolni kell. A tartályok számára rendelkezésre álló helyet meghatározzák a konténer, az elektrolizáló, a kiserőmű és a hidrogéntartályok méretei. Az utóbbit leszámítva a méretek adottak, nem befolyásolhatók. A hidrogéntárolók által elfoglalt helyet a számuk határozza meg. Ha egy oszlopot állítunk belőlük össze, az három tartályból áll és így 12,6 kg hidrogén tárolása válik lehetővé, ami nagyjából 40 nap alatt megtermelhető mennyiséget jelent.

$$m_{tHössz} = m_{tH} \cdot n_{tH} = 4,2 \text{ kg} \cdot 3 = 12,6 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- m_{tH} egy tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- n_{tH} tartályok száma

$$d_H = \frac{m_{tHössz}}{m_{H1nap}} = \frac{12,6 \text{ kg}}{0,317 \text{ kg}} = 39,75 \approx 40 \text{ nap}$$

ahol:

- d_H a napok száma
- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- m_{H1nap} az egy nap alatt előállítható hidrogén tömege

Ez a konténer 12192 mm-es hosszúságából 840 mm-t foglal el. Az elektrolizáló 800 mm, a kiserőmű 2896 mm helyet igényel. Marad 7656 mm. A biogáztartály 2400 mm hosszú, így, a fermentornak és a kompresszornak kihagyva a helyet, 2 tartály fér el egymás után. A tartály

920 mm-es és a konténer 2896 mm-es magasságából kifolyólag 3 darab tartály helyezhető el egymás felett. A tároló és a biogáztartály szélessége rendre 2438 mm és 761 mm, tehát 3 tartály fér el a konténer hossz tengelyére merőleges irányban. Ebből következően összesen 18 darab 1000 literes nyomástartó edénynek jut hely. A gázt 17,24 bar nyomáson tároljuk. Ekkora nyomáson sűrűsége $19,5 \text{ kg/m}^3$ (Unitrove 2023). A tárolható gázmennyiség tehát 351 kg. Ez nagyjából 58 nap alatt megtermelhető biogázmennyiséget jelent, ha csak a gázkeverék előállításához szükséges minimális mennyiséget állítjuk elő.

$$m_{tbg\text{össz}} = n_{tbg} \cdot V_{tbg} \cdot \rho_{tbg} = 18 \cdot 1 \text{ m}^3 \cdot 19,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 351 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{tbg\text{össz}}$ az összes tartály által tárolni képes biogáz tömege
- n_{tbg} tartályok száma
- V_{tbg} egy tartály által tárolni képes biogáz térfogata
- ρ_{tbg} a biogáz sűrűsége 17,24 bar nyomáson

$$d_{bg} = \frac{m_{tbg\text{össz}}}{m_{bg1nap}} = \frac{351 \text{ kg}}{6,03 \text{ kg}} = 58,2 \approx 58 \text{ nap}$$

ahol:

- d_{bg} a napok száma
- $m_{tbg\text{össz}}$ az összes tartály által tárolni képes biogáz tömege
- m_{bg1nap} az egy nap alatt szükséges biogáz tömege

A konténerben fennmaradt egy 2856 mm hosszú, 2438 mm széles és 2896 mm magas hely, amely bőven elegendő egy kompresszor és egy szükséges méretű fermentor elhelyezéséhez. A konténer, 50 tonnás terhelhetőségéből adódóan, a terheléseket bőven elviseli. A trágya mennyiségének és a konténer méretének köszönhetően a szükségesnél több biogáz előállítására is van lehetőség, amely biogáztöbblettel a tároláshoz szükséges nyomás előállítását biztosító kompresszor energiaellátása is megoldható.

Mivel ugyanannyi hidrogént állítunk elő, mint az első változatnál, és mert ehhez elegendő biogázt tudunk termelni, ezért az energetikai számítások nagyrészt megegyeznek a

korábbiakkal. Ennél a változatnál emiatt mindössze a tárolható teljes energiamennyiséget tartom célszerűnek meghatározni. Ez a maximálisan tárolható hidrogén mennyiségétől függ. Ebből következően:

$$W_{tössz} = \eta_{vm} \cdot \left(m_{tHössz} \cdot Q_H + \frac{95}{5} \cdot m_{tHössz} \cdot 0,65 \cdot Q_{CH_4} \right) =$$

$$= 0,315 \cdot \left(12,6 \text{ kg} \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} + \frac{95}{5} \cdot 12,6 \text{ kg} \cdot 0,65 \cdot 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = 2927,1 \text{ MJ}$$

ahol:

- $W_{tössz}$ a legnagyobb tárolható villamosenergia-mennyiség
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- Q_H a hidrogén fűtőértéke
- Q_{CH_4} a metán fűtőértéke

A rendszer tehát legfeljebb 2927,1 MJ, azaz 813,09 kWh villamos energiát tud tárolni.

4.1.3. A harmadik változat

A konténerre, a napelemekre és a hidrogén-előállításra vonatkozó számítások megegyeznek az első és a második változat számításaival. Ebből következően egy nap alatt 0,317 kg hidrogént állítunk elő. Az üzemanyagcella hatásfoka 54%, tehát a legnagyobb 50 kW-os villamos teljesítmény leadásához 92,6 kW teljesítményt kell felvennie, amit a hidrogénnek kell biztosítania.

$$P_{btc} = \frac{P_{vtc}}{\eta_{tc}} = \frac{50 \text{ kW}}{0,54} = 92,6 \text{ kW}$$

ahol:

- P_{btc} a felvett teljesítmény
- P_{vtc} a leadott villamos teljesítmény
- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka

Ahhoz, hogy a rendszer egy órán keresztül tudjon 50 kW villamos teljesítményt biztosítani 92,6 kWh energiára van szükség. A keletkező hidrogén mennyiségéből és fűtőértékéből következően:

$$P_H = \frac{m_{H1nap} \cdot 1000 \cdot Q_H}{t_{s1nap}} = \frac{0,317 \text{ kg} \cdot 10^6 \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}}{24 \cdot 3600 \text{ s}} = 440,3 \text{ W}$$

ahol:

- P_H a hidrogén teljesítménye
- m_{H1nap} az egy nap alatt előállítható hidrogén tömege
- Q_H a hidrogén fűtőértéke
- t_{s1nap} az egy napban lévő másodpercek száma

A számítás alapján egy másodperc alatt 440,3 J energiatartalmú hidrogéngázt állít elő a rendszer. Ahhoz tehát, hogy a legnagyobb 50 kW-os villamos teljesítményt egy órán keresztül tudja a rendszer biztosítani, a hidrogént nem egészen 9 napon keresztül kell a tartályokba gyűjteni.

$$d_{tcmax} = \frac{1000 \cdot W_{btc}}{t_{1nap} \cdot P_H} = \frac{1000 \cdot 92,6 \text{ kWh}}{24 \text{ h} \cdot 440,3 \text{ W}} = 8,76 \approx 9 \text{ nap}$$

ahol:

- d_{tcmax} a napok száma
- W_{btc} a szükséges energia
- t_{1nap} az egy napban lévő órák száma
- P_H a hidrogén teljesítménye

A következőben azt vizsgálom meg, mennyi villamos energiát nyerünk, ha a hidrogént egy teljes napig elraktározzuk.

$$W_{tc1nap} = \eta_{tc} \cdot \frac{P_H}{1000} \cdot t_{1nap} = 0,54 \cdot \frac{440,3 \text{ W}}{1000} \cdot 24 \text{ h} = 5,71 \text{ kWh} \approx 5,7 \text{ kWh}$$

ahol:

- W_{tc1nap} az egy napnyi raktározással nyerhető villamos energia
- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka
- P_H a hidrogén teljesítménye
- t_{1nap} az egy napban lévő órák száma

A számításból következik, hogy egy napnyi raktározással összesen 5,7 kWh villamos energia nyerhető. Ez azt jelenti, hogy 1 nap tartalékolással 5,7 kW villamos teljesítményt tud a fogyasztók számára biztosítani az energiatermelő rendszer egy teljes órán keresztül.

Vizsgáljuk meg, hogy a rendszer képes-e állandó energiaellátást biztosítani! Fentebb láttuk, hogy egy átlagos fogyasztó teljesítménye 273,06 W. A rendszer teljesítményéből az ellátható fogyasztók száma:

$$n_{ftc} = \frac{\eta_{tc} \cdot P_H}{P_f} = \frac{0,54 \cdot 440,3 \text{ W}}{273,06 \text{ W}} = 0,87 \approx 1$$

ahol:

- n_{ftc} a fogyasztók száma
- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka
- P_H a hidrogén teljesítménye
- P_f egy átlagos lakossági fogyasztó teljesítménye

A számítás alapján a rendszer egy átlagosnál némileg kisebb villamosenergia-felhasználású háztartás igényeit folyamatosan ki tudja elégíteni.

Végül fontosnak tartom meghatározni a rendszer által tárolni képes legnagyobb villamosenergia-mennyiséget, ami a tárolható hidrogén mennyiségétől függ. Az első változathoz képest csak a gázmotort cseréltük le a tüzelőanyag-cellára. Ennek mérete és tömege jóval elmarad a kiserőművétől, tehát a konténerben kényelmesen elfér, és a hidrogéntartályok számát sem kell miatta csökkenteni. Több tartály elhelyezése felesleges lenne, így a maximálisan tárolható gázmennyiség itt is 126 kg, amennyit a rendszer 397 nap alatt tud előállítani. Ebből következően:

$$W_{Hmax} = \eta_{tc} \cdot m_{tHössz} \cdot Q_H = 0,54 \cdot 126 \text{ kg} \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 8164,8 \text{ MJ}$$

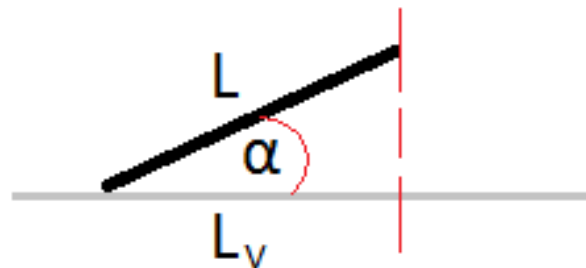
ahol:

- W_{Hmax} a tárolható legnagyobb villamosenergia-mennyiség
- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka
- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- Q_H a hidrogén fűtőértéke

A legnagyobb tárolható energiamennyiség tehát 8164,8 MJ, azaz 2268 kWh.

4.1.4. A negyedik változat

A berendezés kereteit egy szabványos, húsz lábas, magasított kivitelű konténer adja. Ennek tetejére kerülnek a napelemek. Ideális esetben a napelem dőlésszöge 35 fok. A 11. ábra és a számítás alapján ez azt jelenti, hogy egy panel vetületi hossza:



11. ábra A napelem elhelyezkedése a konténer tetején

$$L_v = L \cdot \cos \alpha = 2279 \text{ mm} \cdot \cos 35^\circ = 1866,85 \text{ mm}$$

ahol:

- L_v a napelem vetületi hossza
- L a napelem hossza
- α a napelem dőlésszöge

A konténer szélessége 2438 mm, egy napelemé 1134 mm, így 2 sor napelem fér el a konténer tetején. Egy panel vetületi hossza 1866,85 mm, ami a konténer 6058 mm-es hosszúságát

figyelembe véve 3 darab napelem elhelyezését teszi lehetővé egy sorban. A konténer méretei alapján tehát 2 sorban 3-3, összesen 6 darab panel fér el. Egy panel tömege 28,4 kg, az össztömeg így 170,4 kg, ami nem haladja meg a konténer 25 tonnás teherbírását.

$$m_{\text{össz}} = m \cdot n = 28,4 \text{ kg} \cdot 6 = 170,4 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{\text{össz}}$ a napelemek össztömege
- m egy panel tömege
- n a napelemek darabszáma

Mivel egy darab 550 W-os, ezért ez 3,3 kW összcsúcsteljesítményt jelent.

$$P_{\text{össz}} = P \cdot n = 550 \text{ W} \cdot 6 = 3300 \text{ W} = 3,3 \text{ kW}$$

ahol:

- $P_{\text{össz}}$ az összcsúcsteljesítmény
- P egy darab panel csúcsteljesítménye
- n a napelemek darabszáma

Déli tájolású, árnyékoltságtól mentes, 1kW csúcsteljesítményű napelem, magyarországi viszonyok között, átlagosan 1100 kWh energiát termel egy év alatt (Innovatív Napelem 2023). Így a teljes rendszer évi 3630 kWh-t tud előállítani.

$$W_{\text{össz}} = P_{\text{össz}} \cdot 1100 \text{ kWh} = 3,3 \cdot 1100 \text{ kWh} = 3630 \text{ kWh}$$

ahol:

- $W_{\text{össz}}$ a rendszer által egy év alatt előállított energia
- $P_{\text{össz}}$ az összcsúcsteljesítmény (dimenzió nélkül)

Ezt az energiát használjuk fel hidrogén-előállításra. Egy év alatt az elektrolizáló 53,54 kg gázt tud előállítani, amihez 481,86 kg vízre van szükség. A víz külső forrásból biztosítandó.

$$m_H = \frac{W_{\text{össz}}}{W_{kg}} = \frac{3630 \text{ kWh}}{67,8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 53,54 \text{ kg}$$

ahol:

- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege
- $W_{\text{össz}}$ a rendszer által egy év alatt előállított energia
- W_{kg} egy kilogramm hidrogén előállításához szükséges energia

$$m_{\text{víz}} = m_H \cdot c = 53,54 \text{ kg} \cdot 9 = 481,86 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{\text{víz}}$ az egy év alatt felhasznált víz tömege
- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege
- c konstans, amely a vízben található hidrogén és oxigén tömegarányától függ

Mint fentebb láttuk, az elektrolizáló egy év alatt legfeljebb 210,24 kg hidrogéngázt képes megtermelni. Mivel a napelemek csak 53,54 kg hidrogén előállításához elegendő energiát termelnek évente, ezért az elektrolizáló termelési kapacitása megfelel.

A keletkező hidrogént tartályokban tároljuk. A konténer magassága 2896 mm, szélessége 2438 mm. Egy tartály átmérője 840 mm, magassága 1870 mm, így a tároló hossz tengelyére merőlegesen fektetve 3 tartály fér el egy oszlopban. Az első változatnál ismertettet okoknál fogva a kiserőművet is a konténerben helyezzük el. Az elektrolizáló 800 mm-es, a gázmotor 2896 mm-es és a tároló 6058 mm-es hosszúságából adódóan a tartályok elhelyezésére marad 2362 mm hely, ami 2 oszlop összeállítását teszi lehetővé. Ez 6 hidrogéntartályt jelent, amelyek összesen 25,2 kg hidrogént tudnak tárolni. Mivel majdnem egy fél év alatt előállítható mennyiségről beszélünk, ezért ez a tárolókapacitás kielégítő.

$$m_{tH\text{össz}} = m_{tH} \cdot n_t = 4,2 \text{ kg} \cdot 6 = 25,2 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{tH\text{össz}}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- m_{tH} egy tartály által tárolni képes hidrogén tömege

- n_t tartályok száma

Egy üres tartály tömege 215 kg. Ha az összes tele van, az össztömeg még akkor is csak 1315,2 kg, amely messze elmarad a tároló 25 tonnás terhelhetőségétől.

$$m_{tössz} = (m_t + m_{tH}) \cdot n_t = (215 \text{ kg} + 4,2 \text{ kg}) \cdot 6 = 1315,2 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{tössz}$ a megtelt tartályok össztömege
- m_t egy tartály tömege üresen
- m_{tH} egy tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- n_t tartályok száma

A tárolt hidrogént, tetszőleges időpontban, biogázzal keverve gázkeveréket állítunk elő, amit gázmotorban elégetünk, ezáltal villamos energiát állítva elő. Így, végső soron, a hidrogén, illetve a gázkeverék tárolja a napelemek által termelt energiát, amelyet ezáltal akkor tudunk felhasználni, amikor erre szükség mutatkozik. A hidrogén fűtőértéke 120 MJ/kg (World Nuclear Association 2023). Az egy év alatt megtermelt gáz tehát 6424,8 MJ = 1784,67 kWh energiát tartalmaz.

$$E_{Hössz} = Q_H \cdot m_H = 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 53,54 \text{ kg} = 6424,8 \text{ MJ}$$

ahol:

- $E_{Hössz}$ az egy év alatt előállított hidrogén energiatartalma
- Q_H a hidrogén fűtőértéke
- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege

A metán fűtőértéke 50 MJ/kg (World Nuclear Association 2023). A biogáz csak 65% metánt tartalmaz, így a fűtőérték 32,5 MJ/kg-ra csökken. A keverék 95%-a biogáz. Mivel egy év alatt 53,54 kg hidrogén keletkezik, az ehhez szükséges biogáz 1017,26 kg, amelyet külső forrásból kell biztosítani.

$$m_{bg} = m_H \cdot \frac{95}{5} = 53,54 \text{ kg} \cdot \frac{95}{5} = 1017,26 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{bg} az egy év alatt szükséges biogáz tömege
- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege

Ennek energiatartalma $33060,95 \text{ MJ} = 9183,6 \text{ kWh}$.

$$E_{bg\text{össz}} = 0,65 \cdot Q_{CH_4} \cdot m_{bg} = 0,65 \cdot 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 1017,26 \text{ kg} = 33060,95 \text{ MJ}$$

ahol:

- Q_{CH_4} a metán fűtőértéke
- m_{bg} az egy év alatt szükséges biogáz tömege
- $E_{bg\text{össz}}$ az egy év alatt felhasznált biogáz energiatartalma

Így egy év alatt összesen $1070,8 \text{ kg}$ gázelegyet állítunk elő, $39485,75 \text{ MJ} = 10968,26 \text{ kWh}$ energiatartalommal.

$$m_{gáz} = m_H + m_{bg} = 53,54 \text{ kg} + 1017,26 \text{ kg} = 1070,8 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{gáz}$ az egy év alatt előállított gázkeverék tömege
- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege
- m_{bg} az egy év alatt szükséges biogáz tömege

$$E_{\text{össz}} = E_{H\text{össz}} + E_{bg\text{össz}} = 6424,8 \text{ MJ} + 33060,95 \text{ MJ} = 39485,75 \text{ MJ}$$

ahol:

- $E_{\text{össz}}$ az egy év alatt előállított gázkeverék energiatartalma
- $E_{H\text{össz}}$ az egy év alatt előállított hidrogén energiatartalma
- $E_{bg\text{össz}}$ az egy év alatt felhasznált biogáz energiatartalma

A gázmotor belépő teljesítménye 397 kW a legnagyobb, 125 kW villamos teljesítmény leadása esetén. A gázkeverék energiatartalmából kiszámítható, hogy teljesítménye $1252,08$

W, azaz a rendszer 1 másodperc alatt átlagosan 1252,08 J energiát termel gázkeverék formájában.

$$P_{gáz} = \frac{E_{össz}}{t_s} = \frac{10^6 \cdot 39485,75 \text{ J}}{365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} = 1252,08 \text{ W}$$

ahol:

- $P_{gáz}$ a gázelegy teljesítménye
- $E_{össz}$ az egy év alatt előállított gázkeverék energiatartalma
- t_s az egy évben lévő másodpercek száma

A két teljesítményérték között nagy a különbség, azonban ez nem okoz problémát, hiszen a rendszer lényege elsősorban az, hogy a napenergiát, amikor abból többlet van, hidrogénként tárolja, amit később tetszőleges időpontban felhasználhatunk biogázzal keverve. Ahhoz, hogy a legnagyobb, 125 kW villamos teljesítményt 1 órán keresztül tudja a fogyasztóknak biztosítani a rendszer, tizenhárom napig kell az elektrolizálónak működnie, és a keletkező hidrogént mind a tartályokba kell gyűjteni. Ez a következő számításból látható:

$$d = \frac{E_{bem}}{P_{gáz}} = \frac{397 \text{ kWh}}{1,25208 \text{ kW}} = 317,07 \text{ h} = 13,2 \approx 13 \text{ nap}$$

ahol:

- d a napok száma
- E_{bem} a gázmotor energiaigénye a legnagyobb, 125 kW-os villamos teljesítmény leadása esetén
- $P_{gáz}$ a gázelegy teljesítménye

A következőben azt vizsgálom meg, mennyi villamos energiát nyerünk, ha a hidrogént egy teljes napig elraktározzuk.

$$W_{1nap} = \eta_{vm} \cdot \frac{P_{gáz}}{1000} \cdot t_{1nap} = 0,315 \cdot \frac{1252,08 \text{ W}}{1000} \cdot 24 \text{ h} = 9,47 \text{ kWh} \approx 9,5 \text{ kWh}$$

ahol:

- W_{1nap} az egy napnyi raktározással nyerhető villamos energia

- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $P_{gáz}$ a gázelegy teljesítménye
- t_{1nap} az egy napban lévő órák száma

A számításból következik, hogy egy napnyi raktározással összesen 9,5 kWh villamos energia nyerhető. Ez azt jelenti, hogy 1 nap tartalékolással 9,5 kW villamos teljesítményt tud a fogyasztók számára biztosítani az energiatermelő rendszer egy teljes órán keresztül.

Állandó villamosenergia-ellátásra, az első változatnál említett okoknál fogva, a berendezés nem alkalmas.

Végül fontosnak tartom meghatározni a rendszer által tárolni képes legnagyobb villamosenergia-mennyiséget, ami a tárolható hidrogén mennyiségétől függ. Ez 25,2 kg. Ebből következően:

$$m_{bgmax} = m_{tHössz} \cdot \frac{95}{5} = 25,2 \text{ kg} \cdot \frac{95}{5} = 478,8 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{bgmax} a legnagyobb tárolható hidrogénmennyiséghez szükséges biogáz tömege
- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege

$$m_{gkmax} = m_{tHössz} + m_{bgmax} = 25,2 \text{ kg} + 478,8 \text{ kg} = 504 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{gkmax} a legnagyobb gázkeverék-mennyiség tömege
- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- m_{bgmax} a legnagyobb tárolható hidrogénmennyiséghez szükséges biogáz tömege

$$\begin{aligned} W_{gkmax} &= \eta_{vm} \cdot m_{gkmax} \cdot (0,05 \cdot Q_H + 0,95 \cdot 0,65 \cdot Q_{CH_4}) = \\ &= 0,315 \cdot 504 \text{ kg} \cdot \left(0,05 \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} + 0,95 \cdot 0,65 \cdot 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = 5854,3 \text{ MJ} \end{aligned}$$

ahol:

- W_{gkmax} a tárolható legnagyobb villamosenergia-mennyiség
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- m_{gkmax} a legnagyobb gázkeverék-mennyiség tömege
- Q_H a hidrogén fűtőértéke
- Q_{CH_4} a metán fűtőértéke

A legnagyobb tárolható energiamennyiség tehát 5854,3 MJ, azaz 1626,2 kWh, amelyet a rendszer 172 nap alatt tud előállítani.

$$d_{Wgkmax} = \frac{m_{tHössz}}{m_H} \cdot t_d = \frac{25,2 \text{ kg}}{53,54 \text{ kg}} \cdot 365 = 172 \text{ nap}$$

ahol:

- d_{Wgkmax} a napok száma
- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege
- t_d az egy évben lévő napok száma

4.1.5. Az ötödik változat

A konténerre, a napelemekre és a hidrogén-előállításra vonatkozó számítások megegyeznek a negyedik változat számításaival. Ebből következően egy nap alatt 0,147 kg hidrogént állítunk elő.

$$m_{H1nap} = \frac{m_H}{t_d} = \frac{53,54 \text{ kg}}{365} = 0,147 \text{ kg}$$

ahol:

- m_{H1nap} az egy nap alatt előállítható hidrogén tömege
- m_H az egy év alatt előállítható hidrogén tömege
- t_d az egy évben lévő napok száma

Az üzemanyagcella hatásfoka 54%, tehát a legnagyobb 50 kW-os villamos teljesítmény leadásához, a harmadik változatnál ismertetett számítás alapján, 92,6 kW teljesítményt kell felvennie, amit a hidrogénnek kell biztosítani. Ahhoz, hogy a rendszer egy órán keresztül tudjon 50 kW villamos teljesítményt biztosítani 92,6 kWh energiára van szükség. A keletkező hidrogén mennyiségéből és fűtőértékéből következően:

$$P_H = \frac{m_{H1nap} \cdot 1000 \cdot Q_H}{t_{s1nap}} = \frac{0,147 \text{ kg} \cdot 10^6 \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}}{24 \cdot 3600 \text{ s}} = 204,17 \text{ W}$$

ahol:

- P_H a hidrogén teljesítménye
- m_{H1nap} az egy nap alatt előállítható hidrogén tömege
- Q_H a hidrogén fűtőértéke
- t_{s1nap} az egy napban lévő másodpercek száma

A számítás alapján egy másodperc alatt 204,17 J energiatartalmú hidrogéngázt állít elő a rendszer. Ahhoz tehát, hogy a legnagyobb 50 kW-os villamos teljesítményt egy órán keresztül tudja a rendszer biztosítani, a hidrogént nem egészen 19 napon keresztül kell a tartályokba gyűjteni.

$$d_{tcmax} = \frac{1000 \cdot W_{btc}}{t_{1nap} \cdot P_H} = \frac{1000 \cdot 92,6 \text{ kWh}}{24 \text{ h} \cdot 204,17 \text{ W}} = 18,9 \approx 19 \text{ nap}$$

ahol:

- d_{tcmax} a napok száma
- W_{btc} a szükséges energia
- t_{1nap} az egy napban lévő órák száma
- P_H a hidrogén teljesítménye

A következőben azt vizsgálom meg, mennyi villamos energiát nyerünk, ha a hidrogént egy teljes napig elraktározzuk.

$$W_{tc1nap} = \eta_{tc} \cdot \frac{P_H}{1000} \cdot t_{1nap} = 0,54 \cdot \frac{204,17 \text{ W}}{1000} \cdot 24 \text{ h} = 2,65 \text{ kWh}$$

ahol:

- W_{tc1nap} az egy napnyi raktározással nyerhető villamos energia
- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka
- P_H a hidrogén teljesítménye
- t_{1nap} az egy napban lévő órák száma

A számításból következik, hogy egy napnyi raktározással összesen 2,65 kWh villamos energia nyerhető. Ez azt jelenti, hogy 1 nap tartalékolással 2,65 kW villamos teljesítményt tud a fogyasztók számára biztosítani az energiatermelő rendszer egy teljes órán keresztül.

Vizsgáljuk meg, hogy a rendszer képes-e állandó energiaellátást biztosítani! Fentebb láttuk, hogy egy átlagos fogyasztó teljesítménye 273,06 W. A rendszer teljesítményéből az ellátható fogyasztók száma:

$$n_{ftc} = \frac{\eta_{tc} \cdot P_H}{P_f} = \frac{0,54 \cdot 204,17 \text{ W}}{273,06 \text{ W}} = 0,4$$

ahol:

- n_{ftc} a fogyasztók száma
- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka
- P_H a hidrogén teljesítménye
- P_f egy átlagos lakossági fogyasztó teljesítménye

A számítás alapján a rendszer állandó energiaellátást gyakorlatilag nem képes biztosítani. Lehetőség van azonban több ilyen egység összekapcsolására, amelyek együttesen már elegendő teljesítménnyel rendelkezhetnek állandó energiaellátás biztosítására is.

Végül fontosnak tartom meghatározni a rendszer által tárolni képes legnagyobb villamosenergia-mennyiséget, ami a tárolható hidrogén mennyiségétől függ. A negyedik változathoz képest csak a gázmotort cseréltük le a tüzelőanyag-cellára. Ennek mérete és tömege jóval elmarad a kiserőművétől, tehát a konténerben kényelmesen elfér, és a

hidrogéntartályok számát sem kell miatta csökkenteni. Több tartály elhelyezésének lehetőségét azonban érdemes megvizsgálni a tárolható energiamennyiség növelése érdekében.

A konténer 6058 mm-es hosszúsága, az elektrolizáló 800 mm-es hossza és a tüzelőanyag-cella 511 mm-es szélessége következtében 4747 mm hely marad szabadon, amely 5 oszlop összeállítását teszi lehetővé a nyomástartó edényekből. Ez összesen 15 darab tartályt jelent, amelyek összesen 63 kg hidrogént tudnak tárolni, ami meghaladja az egy teljes év alatt előállítható mennyiséget.

$$m_{tHössz} = m_{tH} \cdot n_t = 4,2 \text{ kg} \cdot 15 = 63 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- m_{tH} egy tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- n_t tartályok száma

Egy üres tartály tömege 215 kg. Ha az összes tele van, az össztömeg még akkor is csak 3288 kg, amely messze elmarad a tároló 25 tonnás terhelhetőségétől.

$$m_{tössz} = (m_t + m_{tH}) \cdot n_t = (215 \text{ kg} + 4,2 \text{ kg}) \cdot 15 = 3288 \text{ kg}$$

ahol:

- $m_{tössz}$ a megtelt tartályok össztömege
- m_t egy tartály tömege üresen
- m_{tH} egy tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- n_t tartályok száma

Ebből következően:

$$W_{Hmax} = \eta_{tc} \cdot m_{tHössz} \cdot Q_H = 0,54 \cdot 63 \text{ kg} \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 4082,4 \text{ MJ}$$

ahol:

- W_{Hmax} a tárolható legnagyobb villamosenergia-mennyiség

- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka
- $m_{tHössz}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- Q_H a hidrogén fűtőértéke

A legnagyobb tárolható energiamennyiség tehát 4082,4 MJ, azaz 1134 kWh.

4.2. Gazdasági számítások

A részletes gazdasági számítások a terjedelmi korlátok miatt itt nem szerepelnek, eredményeik azonban a következő fejezetekben megtalálhatóak.

4.3. A végleges változatok

A gazdasági számítások bizonyos módosításokat indokoltak a különböző változatoknál, éppen ezért, és a könnyebb áttekinthetőség kedvéért, fontosnak tartom röviden összefoglalni az öt végleges változat jellemzőit.

4.3.1. Az első változat

Ez a változat hidrogén és biogáz keverékével működik, a biogáz előállítása és tárolása azonban nem képezi a rendszer részét, ezt külön kell biztosítani. Egy 40 lábas magasított kivitelű konténer tetején található 14 darab 510 W csúcsteljesítményű napelem, benne pedig az elektrolizáló, 3 darab 850 literes hidrogéntartály és a gázmotoros kiserőmű. Összköltsége 8.541.776 Ft. A megtérülési idő 16,3 év. A rendszer villamos teljesítménye 853,34 W. A legnagyobb tárolható villamosenergia-mennyiség 813,09 kWh. Az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség 10.009.763 Ft. Az 1 kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén 10.505 Ft.

4.3.2. A második változat

Ez a változat hidrogén és biogáz keverékével működik, a biogáz előállítása és tárolása is a konténerben történik. Egy 40 lábas magasított kivitelű konténer tetején található 14 darab 510 W csúcsteljesítményű napelem, benne pedig az elektrolizáló, 3 darab 850 literes hidrogéntartály, a biogázfermentor, 13 darab biogáztartály és a gázmotoros kiserőmű. Összköltsége 43.901.776 Ft. A megtérülési idő 83,8 év. A rendszer villamos teljesítménye 853,34 W. A legnagyobb tárolható villamosenergia-mennyiség 813,09 kWh. Az 1 kW

villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség 51.446.724 Ft. Az 1 kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén 53.992 Ft.

4.3.3. A harmadik változat

Ez a változat hidrogénnel működik. Egy 40 lábas magasított kivitelű konténer tetején található 14 darab 510 W csúcsteljesítményű napelem, benne pedig az elektrolizáló, 3 darab 850 literes hidrogéntartály és a tüzelőanyag-cella. Összköltsége 7.215.776 Ft. A megtérülési idő 49,4 év. A rendszer villamos teljesítménye 237,76 W. A legnagyobb tárolható villamosenergia-mennyiség 226,8 kWh. Az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség 30.348.735 Ft. Az 1 kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén 31.816 Ft.

4.3.4. A negyedik változat

Az első kivitel kisméretű változata. Hidrogén és biogáz keverékével működik, a biogáz előállítása és tárolása azonban nem képezi a rendszer részét, ezt külön kell biztosítani. Egy 20 lábas magasított kivitelű konténer tetején található 6 darab 550 W csúcsteljesítményű napelem, benne pedig az elektrolizáló, 3 darab 850 literes hidrogéntartály és a gázmotoros kiserőmű. Összköltsége 6.823.304 Ft. A megtérülési idő 28,2 év. A rendszer villamos teljesítménye 394,41 W. A legnagyobb tárolható villamosenergia-mennyiség 813,09 kWh. Az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség 17.300.238 Ft. Az 1 kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén 8.392 Ft.

4.3.5. Az ötödik változat

A harmadik kivitel kisméretű változata. Hidrogénnel működik. Egy 20 lábas magasított kivitelű konténer tetején található 6 darab 550 W csúcsteljesítményű napelem, benne pedig az elektrolizáló, 3 darab 850 literes hidrogéntartály és a tüzelőanyag-cella. Összköltsége 5.497.304 Ft. A megtérülési idő 81,2 év. A rendszer villamos teljesítménye 110,25 W. A legnagyobb tárolható villamosenergia-mennyiség 226,8 kWh. Az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség 49.861.354 Ft. Az 1 kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén 24.239 Ft.

4.4. Következtetések levonása

A kialakítási lehetőségek megvizsgálása, az energetikai és a gazdasági számítások, valamint a változatok ezek alapján történő véglegesítése után következik az öt változat összehasonlítása és közülük a legelőnyösebbnek bizonyuló konstrukció kiválasztása.

Az 5. táblázatban az öt változat legfontosabb adatai láthatók. Az első sor a berendezés által biztosítani képes legnagyobb villamos teljesítményt tartalmazza, amely a gázmotoros kiserőmű, illetve a tüzelőanyag-cella függvénye. Ahhoz, hogy ezt a teljesítményt a rendszer egy órán keresztül képes legyen leadni, szükség van a hidrogént, a második változatnál pedig a biogázt is, egy meghatározott ideig a konténerben található tárolókba gyűjteni. A második sorból olvasható ki, hogy ez az idő mennyi, ha az összes előállított gázt a tartályokba gyűjtjük. A harmadik sorban található, hogy mennyi villamos energiát nyerünk a berendezés egy teljes napon át történő működtetésével, ha az összes keletkező gázt a tárolókba gyűjtjük. A negyedik sorban van a legnagyobb tárolható villamosenergia-mennyiség, amely a tárolható gáz mennyiségétől függ, az ötödikben pedig az az idő látható, amennyi szükséges ennek a gázmennyiségnek az előállításához. A hatodik sor tartalmazza a rendszer villamos teljesítményét, ami az egy másodperc alatt a berendezés által előállított gázból nyerhető villamos energiából számolható. A hetedik sor a berendezés beruházási költségét tartalmazza. A nyolcadikban található a megtérülési idő, amelyet úgy határoztam meg, hogy a villamos energia aktuális piaci árát figyelembe véve meghatároztam a beruházási költségéből vásárolható villamosenergia-mennyiséget, és kiszámoltam, hogy a berendezés ezt mennyi idő alatt tudja előállítani. A kilencedik sor a beruházási költség a rendszer villamos teljesítményére vonatkoztatva. A tizedik sorban található a beruházási költség a legnagyobb tárolható villamosenergia-mennyiségre vonatkoztatva. A tizenegyedik sorban feltüntetett alkalmazhatóság feltétele arra utal, hogy a berendezés működéséhez mit kell biztosítani (csak víz, víz és hígtrágya, víz és biogáz). Minél kevesebb mindent, annál szélesebb körben alkalmazható. A tizenkettedik sor a berendezés méretére utalva a konténer nagyságát tartalmazza, amely minél kisebb, annál előnyösebb. A táblázat segíti a különböző változatok összehasonlítását a legfontosabb jellemzők összegzésével, egyben egy döntési mátrix is, amely segítségével könnyen kiválasztható a legjobb változat. Az 5. táblázat tartalmazza a versenyeztetés szempontjait, a tulajdonságok súlyozását és értékelését. A súlyszámok a megfelelő tulajdonságkategóriák után zárójelben láthatók, értékük 1-től 5-ig terjedhet. Az értékszámok 0 és 5 közötti értékeket vehetnek fel és a konkrét tulajdonságok után található, szintén zárójelben.

5. táblázat Az öt változat legfontosabb adatai

		<i>Az első változat</i>	<i>A második változat</i>	<i>A harmadik változat</i>	<i>A negyedik változat</i>	<i>Az ötödik változat</i>
1	<i>Legnagyobb leadható villamos teljesítmény (4)</i>	125 kW (5)	125 kW (5)	50 kW (3)	125 kW (5)	50 kW (3)
2	<i>Legnagyobb teljesítmény egy órán át történő leadásához szükséges gyűjtési idő (5)</i>	6 nap (5)	6 nap (5)	9 nap (4)	13 nap (3)	19 nap (1)
3	<i>Egy napnyi gyűjtéssel tárolható villamos energia (5)</i>	20,5 kWh (5)	20,5 kWh (5)	5,7 kWh (3)	9,5 kWh (4)	2,65 kWh (2)
4	<i>Legnagyobb tárolható villamosenergia-mennyiség (3)</i>	813 kWh (5)	813 kWh (5)	226,8 kWh (4)	813 kWh (5)	226,8 kWh (4)
5	<i>Legnagyobb tárolható villamosenergia-mennyiség előállításához szükséges idő (3)</i>	40 nap (5)	40 nap (5)	40 nap (5)	86 nap (4)	86 nap (4)
6	<i>A rendszer villamos teljesítménye (4)</i>	853,34 W (5)	853,34 W (5)	237,76 W (3)	394,41 W (4)	110,25 W (2)
7	<i>A berendezés beruházási költsége (3)</i>	8.541.776 Ft (3)	43.901.776 Ft (1)	7.215.776 Ft (4)	6.823.304 Ft (4)	5.497.304 Ft (5)
8	<i>Megtérülési idő (5)</i>	16,3 év (5)	83,8 év (1)	49,4 év (3)	28,2 év (4)	81,2 év (1)
9	<i>1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség (5)</i>	10.009.763 Ft (5)	51.446.724 Ft (1)	30.348.735 Ft (3)	17.300.238 Ft (4)	49.861.354 Ft (2)
10	<i>1 kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség (4)</i>	10.505 Ft (5)	53.992 Ft (1)	31.816 Ft (4)	8.392 Ft (5)	24.239 Ft (4)

11	<i>Alkalmazhatóság feltétele (3)</i>	Víz és biogáz külső forrásból (2)	Víz és hígtrágya külső forrásból (3)	Víz külső forrásból (5)	Víz és biogáz külső forrásból (2)	Víz külső forrásból (5)
12	<i>Konténer nagysága (2)</i>	Szabványos, 40 lábas, magasított (4)	Szabványos, 40 lábas, magasított (4)	Szabványos, 40 lábas, magasított (4)	Szabványos, 20 lábas, magasított (5)	Szabványos, 20 lábas, magasított (5)
	Összpontszám	213	154	167	186	130

Az 5. táblázatban található összehasonlítás alapján az első változat bizonyult a legjobbnak, emiatt először a többi változatról szeretnék beszélni.

A második változatra jellemző, konténerben történő biogáz-előállítás és biogáztárolás nem bizonyult gazdaságos megoldásnak. Műszakilag megvalósítható és energetikailag sem szerepelt rosszul, de a nagy beruházási költség és fajlagos költségek, valamint a több mint 80 évnyi megtérülési idő csak az utolsó előtti helyhez voltak elegendők. A pontozásból jól látható, hogy a biogázt nagyobb mennyiségben, külön erre a célra kiépített biogázüzemben célszerű termelni, ahonnan, mint külső forrásból, a működéshez szükséges mennyiséget biztosítjuk. Így a gázkeveréket használó változatok közül csak azok jöhetnek szóba, amelyek kizárólag a hidrogént állítják elő és tárolják a konténerben.

Ezek közül a második helyen végzett négyes számú, kisméretű változat nem rendelkezik sokkal rosszabb tulajdonságokkal, mint nagyobb párja. Beruházási költsége és a tárolható villamos energiára vetített fajlagos költsége pedig még alacsonyabb is, de az első változat előnyösebb volta ezt háttérbe szorítja. A kisebb méret kevesebb napelem elhelyezését teszi lehetővé, ezért az egész rendszer sokkal lassabban tudja előállítani a tárolni kívánt energiát, ami a megtérülési időn is meglátszik. Ettől függetlenül elmondható, hogy ha a jelenlegi körülmények között ez a változat nem is gazdaságos, a jövőben komoly lehetőséget rejt magában. A villamos energia árának várható növekedése, a részegységek árának a műszaki fejlődésből következő csökkenése, valamint az esetleges állami támogatás nagyban csökkentheti a megtérülési időt, amellyel ez a változat is piacképesé válhat.

Az előbb említettek igazak mindegyik változatnál, a harmadik, csak hidrogént használó, nagyméretű berendezésnél pedig különösen azok. Ennél további előnyt jelent, hogy míg a gázkeverékes változat csak olyan helyen használható, ahol megfelelő mennyiségű, külső

forrásból biztosított biogáz áll rendelkezésre, addig a tüzelőanyag-cellás lényegében bárhol, hiszen működéséhez csak vízre van szükség. Hátránya azonban a gázkeverékes változatokkal szemben, hogy itt csak a hidrogén szolgáltat energiát. Gázkeverék hiányában a rendszer energiatermelése lassabb. Ebből következik az is, hogy a tüzelőanyag-cella jóval kisebb maximális teljesítmény leadására képes, mint a gázmotoros kiserőmű, hiszen az ehhez szükséges gáz előállítása még így is jelentősen hosszabb ideig tart. A nagyméretű üzemanyagcellás változat a harmadik helyen végzett.

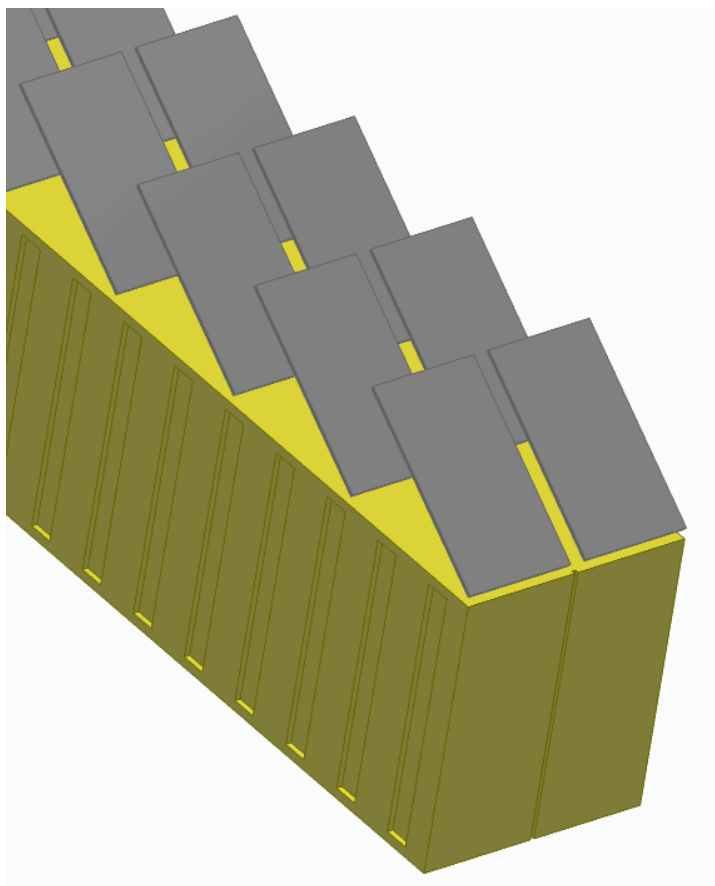
Ennek kisméretű verziója az ötös számú változat, amely a második változathoz is rosszabbul szerepelve az utolsó helyen végzett. A legfőbb probléma a nagyon lassú energiatermelés, és az ebből adódó hatalmas, a rendszer villamos teljesítményére vonatkoztatott fajlagos beruházási költség és a rendkívül hosszú megtérülési idő.

A győztes változat bemutatása előtt szerepeljen itt az öt változat rangsorolva, a megvalósíthatóság és gazdaságosság, valamint a felhasználhatóság figyelembevételével. Ez a 6. táblázatban látható.

6. táblázat A változatok rangsora

I.	<i>Az első változat</i>
II.	<i>A negyedik változat</i>
III.	<i>A harmadik változat</i>
IV.	<i>A második változat</i>
V.	<i>Az ötödik változat</i>

Az öt változat közül kétségtelenül az első bizonyult a legjobbnak, sőt ez az egyetlen, amely akár jelenleg is gazdaságosan megvalósítható. Egyszerű vázlatát a 12. ábra mutatja.



12. ábra A győztes, első számú, nagyméretű gázkeverékes változat vázlata

Ez egy olyan nagyméretű, gázkeveréket használó kialakítás, amelyhez a biogázt külső forrásból kell biztosítani. A konténerben csak a hidrogén előállítása és tárolása történik, valamint a gázkeverék felhasználásával a villamos energia előállítása. A rendszert egy negyven láb hosszú, szabványos, magasított kivitelű konténer tartalmazza. Ennek tetején helyezkedik el a tizennégy darab Elmark 98SOL510M típusú, egyenként 510 W csúcsteljesítményű napelem. A konténer belsejében található a Nel Pem S10 típusú elektrolizáló, a három darab, 850 literes Mahytec hidrogéntartály, valamint a Caterpillar G3406NA típusú gázmotoros kiserőmű. A legnagyobb leadható villamos teljesítmény 125 kW, amelynek egy órán át történő biztosításához az elektrolizáló hat napon keresztül történő működése szükséges. Ha az elektrolizálót egy teljes napig működtetjük, akkor ezáltal 20,5 kWh villamos energiát tudunk előállítani. A legnagyobb tárolható villamosenergia-mennyiség 813 kWh, amihez negyven napon keresztül kell a gázt előállítani. Azaz, legfeljebb negyven napig működtethető a berendezés villamosenergia-felhasználás nélkül. A rendszer villamos teljesítménye 853,34 W. Ennyi joule villamos energiát tud előállítani egy másodperc alatt. Az előbbi tulajdonságok szempontjából az első számú változat a legeredményesebben teljesített az öt lehetőség közül. Bekerülési költsége 8.541.776 Ft, ami a második legmagasabb ugyan,

de ennek a legkisebb a teljesítményre vetített fajlagos költsége (10.009.763 Ft) és a megtérülési ideje is (16,3 év), valamint a tárolható villamos energiára vetített fajlagos költsége a második legalacsonyabb (10.505 Ft). Kedvező jellemzőihez nagyban hozzájárul az, hogy a működéséhez szükséges biogázt külső forrásból kell biztosítani, ami egyben a berendezés legnagyobb hátránya is, hiszen csak ott használható, ahol ez adott.

A berendezés egyik legnagyobb előnye, hogy olyan helyeken is elérhetővé teszi a villamos energiát, amelyek a hálózattól messze esnek. A biogázszükséglet miatt elsősorban a megfelelő mezőgazdasági üzemek környezetében alkalmazható, de nemcsak az üzemek saját szükségleteinek kielégítésére, hanem akár a lakosság ellátására is. Mivel lehetőség van több berendezés összekapcsolására, az előállított és tárolt energia mennyisége nagymértékben növelhető. Jelentősége vitathatatlan, hiszen a jövőben komolyan segíthet a villamosenergia tárolásának nehéz feladatát megvalósítani, továbbá sokat tehet a decentralizált energiatermelés, az energiafüggetlenség megvalósítása és a környezet terhelésének csökkentése érdekében.

5. Összefoglalás

Dolgozatom célja egy olyan energiatermelő és energiatároló berendezés lehetőségének vizsgálata volt, amely napelemek segítségével hidrogént állít elő. Ezt tárolás után önmagában vagy biogázzal keverve felhasználva villamos energia állítható elő egy mobil, konténerizált kialakítás keretében. Ezáltal képesek vagyunk a napenergiát tárolni, és tetszőleges időpontban felhasználni villamos energia formájában. A szakirodalom-feldolgozás után öt változatot vizsgáltam meg. Miután bemutattam a különböző változatokat, elvégeztem az energetikai vizsgálataikat és foglalkoztam a kialakítási lehetőségekkel is. Ezt követte egy részletes gazdasági számítás. A számítások alapján bemutattam a véglegesített változatokat, majd összehasonlítottam őket. A legjobbnak a nagyméretű, gázkeverékes változat bizonyult. A villamos teljesítményre vonatkozó fajlagos költsége ennek volt a legalacsonyabb, a tárolható energiára vonatkozó pedig a második legalacsonyabb. A megtérülési időt is figyelembe véve, amely ennél volt a legrövidebb, az egyetlen, jelenlegi körülmények között gazdaságosan megvalósítható változatnak bizonyult. Egyetlen jelentősebb hátránya, hogy csak ott használható, ahol elegendő, külső forrásból biztosítandó biogáz áll rendelkezésre. Ennek kisméretű változata nem szerepelt sokkal rosszabbul, ráadásul a tárolható villamos energiára vonatkozó fajlagos költsége ennek volt a legalacsonyabb, azonban a nagyobb előnyösebb tulajdonságai ezt háttérbe szorítják. A konténerben történő biogáz-előállításnak és biogáztárolásnak nincs gazdasági létjogosultsága, csakúgy, mint a kisméretű hidrogén-tüzelőanyagcellás változatnak sem. Utóbbi nagyméretű változata sem bizonyult gazdaságosnak, ám ennek, a technológia költségeinek várható csökkenése miatt, a közeli jövőben már lehet létjogosultsága. További fontos előnye, hogy működtetéséhez csak vízre van szükség, amely szinte bárhol lehetővé teszi alkalmazását.

Irodalomjegyzék

- [1] Amez, Isabel; Bolonio, David; Castells, Blanca; García-Martínez, María Jesús; García-Torrent, Javier; Llamas, Bernardo; Lorenzo, José L.; Ortega, Marcelo F. (2021): Experimental Study of Biogas-Hydrogen Mixtures Combustion in Conventional Natural Gas Systems; Energy, Resources and the Environment
- [2] Anand, Kundan; Kumar, Bhavnes; Mittal, Alok Prakash (2023): Feasibility analysis of biogas plant for the northern plains of India, Energy for Sustainable Development, Volume 74, pp. 454-462
- [3] Aqua-Calc (2023): Weight of Nitrogen gas, <https://www.aqua-calc.com/calculate/volume-to-weight/substance/nitrogen-blank-gas> (utolsó elérés: 2023.07.01.)
- [4] Arlt, Wolfgang; Teichmann, Daniel; Wasserscheid, Peter (2012): Liquid Organic Hydrogen Carriers as an efficient vector for the transport and storage of renewable energy, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 37, Issue 23, pp. 18118-18132
- [5] BioEnergy Consult (2021): Types of Biogas Storage Systems, <https://www.bioenergyconsult.com/biogas-storage/> (utolsó elérés: 2023.04.18.)
- [6] Bölkény Ildikó, Vadászi Marianna (2020): Hidrogén előállításának lehetőségei, XIII. Tudomány- és Technikatörténeti Online Konferencia
- [7] Breeze, Paul (2018): Chapter 8 - Hydrogen Energy Storage, Power System Energy Storage Technologies, pp. 69-77
- [8] Cimc Honto (2023): Gas Storage Tanks, https://www.alibaba.com/product-detail/CIMC-HONTO-ASME-Chinese-Standard-1000_1600152174866.html (utolsó elérés: 2023.07.13.)
- [9] CreatifWerks (2023): Carbon Dioxide Quantity Conversions Calculator, <https://www.creatifwerks.com/carbon-dioxide-quantity-conversions-calculator/> (utolsó elérés: 2023.07.01.)
- [10] Dobránszky János, Katula Levente, Varbai Balázs (2022): A hidrogén tárolásának és szállításának lehetőségei, Anyagvizsgálatok lapja 2022/II. lapszám
- [11] DOE, United States Department of Energy (2023): Fuel Cells, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells> (utolsó elérés: 2023.07.03.)
- [12] Dong, Xinyu; Fang, Zhenchang; Lv, Zhao; Qiao, Xinqi; Sun, Chunhua; Tang, Xincheng; Wang, Lintao; Yu, Xiangyu (2023): Study on supercritical CO₂ power cycles for natural gas engine energy cascade utilization, Applied Thermal Engineering, Volume 225, (a)
- [13] Dong, Xueqiang; Gong, Maoqiong; Wang, Haocheng; Yang, Jingyao (2023): Performances comparison of adsorption hydrogen storage tanks at a wide temperature and pressure zone, International Journal of Hydrogen Energy, (b)
- [14] Elektrobagoly (2023): Félcélás napelemek, <https://elektrobagoly.hu/napelem-monokristalyos-felcellas-510w.html> (utolsó elérés: 2023.06.23.), (a)
- [15] Elektrobagoly (2023): Napelemek, <https://elektrobagoly.hu/austa-au550-36-mhb-550w-teljesitmeny-meret-2279x1134x35mm-144-cellas-12x12.html> (utolsó elérés: 2023.07.04.), (b)
- [16] Galyas Anna Bella, Szunyog István (2018): Biogáz-előkészítés I., Miskolci Egyetem
- [17] Gazdavilág (2013): Állategység-számítás, https://gazdavilag.hu/index.php?option=com_content&view=article&id=67&Itemid=12 (utolsó elérés: 2023.07.01.)
- [18] GOLED (2023): Napelem panelek, https://www.goled.hu/450w-felcellas-monokristalyos-napelem-panel/?gad=1&gclid=CjwKCAjwwb6lBhBJEiwAbuVUSltqdm0nfUq3DU1rmkQjPNF3_-RvhZzxueazQHfjC9cNowMaBacJXR0CxUEQAvD_BwE (utolsó elérés 2023. 07.13.)
- [19] González, J. L.; Sánchez, M. (2005): The fertilizer value of pig slurry. I. Values depending on the type of operation, Biosource Technology, Volume 96, Issue 10, pp. 1117-1123
- [20] Govindasamy, Dhanusiya; Kumar Ashwani (2023): Experimental analysis of solar panel efficiency improvement with composite phase change materials, Renewable Energy, Volume 212, pp. 175-184
- [21] Gülzow, E.; Schulze, M. (2008): Alkaline Fuel Cell, Materials for Fuel Cells

- [22] Han, Jaesu; Kim, Younghyeon; Yu, Sangseok (2023): Establishment of energy management strategy of 50 kW PEMFC hybrid system, *Energy Reports*, Volume 9, pp. 2745-2756
- [23] Herrera, Omar E.; Katsu, Kyle; Mérida, Walter; Patlolla, Shashank Reddy; Sharafian, Amir; Wei, Kevin (2023): A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 181
- [24] Horváth Róbert (2011): Megújuló energia
- [25] Huntraco (2023): Földgázmotoros áramfejlesztők, https://www.huntraco.hu/foldgazmotoros_aramfejlesztok/27/g3406_na_foldgazmotoros_aramfejlesztok_p (utolsó elérés: 2023.06.23.)
- [26] Hyfindr (2023): Fuel Cell Module T500 Series, <https://hyfindr.com/marketplace/systems/fuel-cell-systems/fuel-cell-module-t505-series-50-kw/> (utolsó elérés: 2023.07.03.)
- [27] Innovatív Napelem (2023): Hogyan számoljuk ki a napelem rendszer teljesítményét?, <https://innovativnapelem.hu/hogyan-szamoljuk-ki-a-napelem-rendszer-teljesitmenyet.html> (utolsó elérés: 2023.03.13.)
- [28] Jin, Guangming; Qin Liuli; Zhu Jun (2023): High-efficiency and cost-effective manufacturing of solar cells based on localized surface plasmonic resonance, *Optical Materials*, Volume 141
- [29] Karpilov, Igor; Pashchenko, Dmitry (2023): Steam methane reforming over a preheated packed bed: Heat and mass transfer in a transient process, *Thermal Science and Engineering Progress*, Volume 42
- [30] Kasza Anett (2009): A napenergia és szélenergia alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata hazánkban, *Hadmérnök IV. Évfolyam 2. szám*
- [31] Keen (2023): Hydrogen, <https://keengas.com/gases/hydrogen/> (utolsó elérés: 2023.06.24.)
- [32] Klose, Anselm; Lange, Hannes; Lippmann, Wolfgang; Urbas, Leon (2023): Technical evaluation of the flexibility of water electrolysis systems to increase energy flexibility: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*
- [33] Konténer Hungária Kft. (2023): Konténer méretek és adatok, <https://www.kontener.hu/kontener-kisokos/kontener-meretek> (utolsó elérés: 2023.06.23.)
- [34] K-Tainer (2023): 20ft High Cube Container, <https://www.k-tainer.eu/en/20ft-high-cube-container> (utolsó elérés: 2023.07.04.)
- [35] Kumar, S. Shiva; Lim, Hankwon (2022): An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production, *Energy Reports*, Volume 8, pp. 13793-13813
- [36] Lymberopoulos, Nicolaos; Varkarakis, Elli; Zoulias, Emmanuel (2004): A Review on Water Electrolysis
- [37] Mahytec (2023): Compressed Hydrogen Storage, <https://www.mahytec.com/en/compressed-hydrogen-storage/> (utolsó elérés: 2023.03.13.)
- [38] MHT, Magyar Hidrogén és Tüzelőanyag-cella Egyesület (2023): Tüzelőanyag-cellák, <https://www.hfc-hungary.org/tuzeloanyag-cellak/> (utolsó elérés: 2023.07.03.)
- [39] ModuGo (2023): Benefits and Common Uses of 40 ft Steel Shipping Containers, <https://modugo.com/40-ft-shipping-container-dimensions/> (utolsó elérés: 2023.06.27.)
- [40] MVM (2023): Árak-árszabások, <https://www.mvmnext.hu/aram/pages/aloldal.jsp?id=791> (utolsó elérés: 2023.07.15.), (b)
- [41] MVM (2023): Átlagos éves fogyasztás, <https://www.mvmnext.hu/aram/pages/aloldal.jsp?id=550565> (utolsó elérés: 2023.03.13.), (a)
- [42] Nagy Valéria (2010): A biogáz előállítási eljárások hatása a gázmotorok üzemére, különös tekintettel a károsanyag kibocsátásra, Budapest
- [43] NAK (2023): Intenzifikáció? - Mekkora az európai állattartó telepek tényleges mérete, <https://nak.hu/tajekoztatasi-szolgalatas/mezogazdasagi-termeles/105317-intenzifikacio-mekkora-az-europai-allattarto-gazdasagok-tenyleges-merete> (utolsó elérés: 2023.07.01.)
- [44] Nel (2023): S Series PEM Electrolyser, <https://nelhydrogen.com/product/s-series/> (utolsó elérés: 2023.06.24.)
- [45] Peter Jacob Jørgensen (2009): Biogas - green energy, <https://www.lemvigbiogas.com/BiogasPJJuk.pdf> (utolsó elérés: 2023.07.01.)

- [46] Szauter Ákos (2009): Nagyító alatt a gázmotor, VGF& HKL, <https://www.vgfszaklap.hu/lapszamok/2009/november/1597-nagyito-alatt-a-gazmotor> (utolsó elérés: 2023.03.06.)
- [47] Termester (2023): 20 lábas konténerek, <https://termester.hu/kontenerek/20-labas-uj-egyutas-raktarkontener/> (utolsó elérés 2023. 07.13.), (b)
- [48] Termester (2023): 40 lábas konténerek, https://termester.hu/kontenerek/40-labas-hc-uj-egyutas-raktarkontener/?gclid=CjwKCAjwwb6lBhBJEiwAbuVUSq2HOyrlbNOZ183kk9rN4P7PT0kj1AcTSCX5TX-tJ5QBbLTAOjOdthoCedAQAvD_BwE (utolsó elérés 2023. 07.13.), (a)
- [49] TÜV Rheinland (2023): Hidrogén előállítása, a hidrogéntermelés áttekintése, <https://www.tuv.com/landingpage/hu/hydrogen-technology/main-navigation/production/> (utolsó elérés: 2023.02.21.), (a)
- [50] TÜV Rheinland (2023): Nyomástartó hidrogéntartályok és egyéb tárolási módszerek, <https://www.tuv.com/landingpage/hu/hydrogen-technology/main-navigation/storage/> (utolsó elérés: 2023.02.27.), (b)
- [51] Unitrove (2023): Natural Gas Density Calculator, <https://www.unitrove.com/engineering/tools/gas/natural-gas-density> (utolsó elérés: 2023.07.01.)
- [52] VL (2009): Áramot termel a biogáz kiserőmű Kenderesen, <https://www.villanylap.hu/lapszamok/2009/marcius/1035-aramot-termel-a-biogaz-kiseromu-kenderesen> (utolsó elérés: 2023.07.01.)
- [53] World Nuclear Association (2023): Heat Values of Various Fuels, <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx> (utolsó elérés: 2023.03.13.)