

DIPLOMAMUNKA

RÁTKAI MÁRTON
gépészmérnöki MSc

Gödöllő
2023



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus
Gépészmérnöki szak

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

Belső konzulens: Dr. Oldal István
egyetemi docens

Külső konzulens: Dr. Barkó György
senior TRS manager
GE Hungary Kft.

Készítette: **Rátkai Márton**
UIIGWP
tagozat: nappali

Intézet/Tanszék: Műszaki Intézet
Gépszerkezettani Tanszék

Gödöllő
2023

MŰSZAKI INTÉZET
GÉPÉSZMÉRNÖKI MESTERSZAK
Műszaki fejlesztő specializáció

DIPLOMADOLGOZAT
feladatlap

Rátkai Márton (UI1GWP)

részére

A diplomadolgozat címe:

Megújuló energia előállítására és időszakos tárolására alkalmas mobil platform tervezése

Feladatkiírás:

Bevezetés, szakirodalom feldolgozása, probléma bemutatása, egy energiatermelő és -tároló berendezés megvalósítási lehetőségeinek vizsgálata, a különböző változatok bemutatása, kialakítások részletezése, energetikai és gazdasági számítások elvégzése, a végleges változatok bemutatása, következtetések levonása, összefoglalás

Közreműködő tanszék: Gépszerkezettani

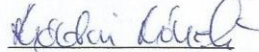
Külső konzulens: Dr. Barkó György sen. TRS manager, GE Hungary Kft., 2112 Veresegyház, Kistrét u. 1.

Belső konzulens: Dr. Oldal István egyetemi docens, MATE, Műszaki Intézet

A dolgozat beadási határideje: 2023. 11. 06.

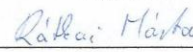
Kelt: Gödöllő, 2023. 09. 21.

Jóváhagyom


(tanszékvezető)

(szakfelelős)

Átvettem


(hallgató)

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

Kelt: Gödöllő, 2023. 09. 21.


(külső konzulens)

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	6
2. Irodalmi áttekintés	7
2.1. Napelemek	7
2.2. Hidrogén előállítása	8
2.2.1. <i>Előállított hidrogén fajták, tekintettel a gyártástechnológia környezeti hatására</i>	9
2.2.2. <i>Hidrogénelőállítási lehetőségek</i>	9
2.2.2.1. <i>Elektrolízis</i>	9
2.2.2.2. <i>Gőzreformálás</i>	10
2.2.2.3 <i>Metán pirolízis</i>	11
2.3. Hidrogén tárolása	11
2.3.1. <i>A sűrített hidrogéngáz tárolása</i>	12
2.3.1.1. <i>A hidrogéntartályok és -tartányok típusai gáznemű hidrogén tárolására</i>	12
2.3.2. <i>A cseppfolyós hidrogén tárolása</i>	13
2.3.3. <i>Hidrogéngáz kémiaailag kötött formában való tárolása</i>	14
2.3.3.1. <i>Szilárd halmazállapotban történő tárolás</i>	14
2.3.3.2. <i>Folyékony szerves hidrogénhordozók</i>	14
2.3.3.3. <i>Metángázzá alakítás</i>	14
2.4. Biogáz-előállítás	15
2.5. Biogáztárolás	16
2.5.1. <i>Alacsony nyomású biogáztárolás</i>	16
2.5.2. <i>Közepes nyomású biogáztárolás</i>	17
2.5.2. <i>Magas nyomású biogáztárolás</i>	17
2.6. Biogáz és hidrogén alkotta gázkeverékek	17
2.7. Gázmotorok	18
2.8. Tüzelőanyag-cellák	19
2.8.1. <i>Alkálikus üzemanyagcella</i>	19
2.8.2. <i>Protoncserélő-membrános üzemanyagcella</i>	20
2.8.3. <i>Szilárd-oxidos üzemanyagcella</i>	20
3. Anyag és módszer	21
3.1. Az első változat	21
3.2. A második változat	26
3.3. A harmadik változat	27
3.4. A negyedik változat	28
3.5. Az ötödik változat	31

4. Eredmények	32
4.1. Kialakítás és energetikai számítások	32
<i>4.1.1. Az első változat</i>	32
<i>4.1.2. A második változat</i>	41
<i>4.1.3. A harmadik változat</i>	46
<i>4.1.4. A negyedik változat</i>	49
<i>4.1.5. Az ötödik változat</i>	56
4.2. Gazdasági számítások	60
<i>4.2.1. Az első változat</i>	60
<i>4.2.2. A második változat</i>	65
<i>4.2.3. A harmadik változat</i>	68
<i>4.2.4. A negyedik változat</i>	71
<i>4.2.5. Az ötödik változat</i>	74
4.3. A végleges változatok	76
<i>4.3.1. Az első változat</i>	77
<i>4.3.2. A második változat</i>	77
<i>4.3.3. A harmadik változat</i>	77
<i>4.3.4. A negyedik változat</i>	78
<i>4.3.5. Az ötödik változat</i>	78
4.4. Következtetések levonása	78
5. Összefoglalás	84
6. Summary	85
Irodalomjegyzék	88

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.

Diplomamunkám 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).

A napelemek alkalmazási területe igen széles skálát ölel fel, egészen a napelemmel működő számológépektől a több megawatt teljesítményű erőművekig. A jelenleg elterjedt napelemek főleg szilícium alapanyagból készülnek (kristályos szilícium szelet, amorf szilícium vékonyréteg technológiánál), de létezik gallium-arzenid, kadmium-szulfid és réz-indium-diszelenid alapú is. A napelemgyártás kétféle technológiával történik, ezért alapvetően kétfajta tudunk megkülönböztetni (Kasza 2009). Az egyik a szelet vagy kristályos technológia, amelyet a félvezetőgyártásból fejlesztettek ki, mint polikristályos technológiát. Ennek a típusnak nagy a hatásfoka, azonban ez az árban is megmutatkozik. A polikristályos szilícium alapú napelemek hatásfoka alapból 15-17% körüli, laboratóriumi körülmények között ezt közel 25%-ra lehet növelni, több réteg együttes alkalmazásával viszont akár a 30% is elérhető (Govindasamy, Kumar 2023). A másik a vékonyréteg technológia, ahol a fejlesztések legfőbb feladata az volt, hogy csökkentsék az árat, a hatásfok növelése mellett. A legtöbb esetben gazdaságosabb, mint a kristályos technológia, mivel olcsóbb, hatásfoka pedig megközelítőleg akkora. Fontos különbség a szelet és a vékonyréteg technológiával készített elemek között, hogy a szilícium napelemek pn átmenetét általában egy adalék anyag diffúziójával alakítják ki az alapanyag felületében. A vékonyréteg technológiánál pedig a különböző rétegek egymást követő kristályosításával

készítik el a határréteget, sokszor különböző anyagokat felhasználva az átmenetekben, amit hetero átmenetnek nevezünk (Jin et al. 2023).

A nap spektruma jóval szélesebb, mint egy félvezető elnyelési sávja. Többek között ez az oka a napelemek korlátozott hatásfokának. Megoldást jelent erre a problémára a különböző anyagok kombinációjából felépített elem, amely sokkal jobban tudja a fényt elnyelni, mint az egyszerű változat. Az optimális besugárzásra forgatott napelem sem fog állandóan teljesítményt adni, hiszen a sugárzás mértéke több okból is változhat, lecsökkenhet. Ilyen lehet a Nap felhők általi eltakarása vagy a napnyugta. Mivel a fogyasztóknak a leggyakrabban folyamatosan kellene üzemelni, viszont a napelem nem tud állandóan energiát szolgáltatni, valamilyen átmeneti energiatárolót kell alkalmazni a rendszerben, amivel áthidalható az alacsonyabb napfényintenzitású időszak. Az előállított villamos energia tárolása kihívást jelent. Ennek oka, hogy az energiát gyakran éppen akkor szeretnénk felhasználni, amikor az a napsugárzás hiánya miatt nem áll rendelkezésre kellő mértékben, vagy fordítva, azaz akkor van energiahozam, amikor nincs igény a felhasználásra. A napelemek által biztosított villamos energia tárolása legegyszerűbben akkumulátorokkal oldható meg (Horváth 2011).

Az energia tárolásának egy másik 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. Előállított hidrogén fajták, tekintettel a gyártástechnológia környezeti hatására

A hidrogén-előállítók számos gyártási eljárást alkalmaznak. Az előállítási módtól és az előállításához felhasznált energiától függően a hidrogént különböző színekkel jelölik, amelyek az alkalmazott gyártási eljárás éghajlatra gyakorolt hatására utalnak. A zöld hidrogént víz elektrolízisével hozzák létre, kizárólag megújuló forrásokból (például napenergia vagy szélenergia) származó villamos energia alkalmazásával. A használt elektrolízis technológiától függetlenül a zöld hidrogén előállítása teljesen klímasemleges. A szürke hidrogént fosszilis energiahordozókból állítják elő, jellemzően gőzreformálással. Az eljárás során a légkörbe kerülő szén-dioxid hozzájárul az üvegházhatáshoz, ami környezeti terhelést jelent. Egy tonna hidrogén előállítása nagyjából tíz tonna szén-dioxid kibocsátásával jár együtt. A kék hidrogén előállítása úgy történik, mint a szürke hidrogéné. A keletkező szén-dioxidot azonban felfogják és tartósan tárolják. Ezt a technológiát szén-dioxid-leválasztásnak és -tárolásnak (CCS) nevezik. Ezzel a megoldással a gőzreformálás során keletkező szén-dioxid nem kerül a légkörbe, emiatt ez a módszer is klímasemleges. A szén-dioxid tárolásának hosszú távú hatásai még ismeretlenek. A türkiz hidrogént a metán termikus krakkolásával (metán pirolízis) állítják elő. Ennek a folyamatnak szilárd szén az eredménye. Ahhoz, hogy a türkiz hidrogén klímasemleges legyen, a nagy hőmérsékletű reaktorba juttatott hőnek megújuló forrásból kell származnia, a szén pedig tartósan kötött állapotban kell, hogy maradjon (TÜV Rheinland 2023a).

2.2.2. Hidrogénelőállítási lehetőségek

Mivel a hidrogén a természetben csak kémiai 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.

2.2.2.1. 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 nemesfémmele 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). 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).

Az elektrolízis során korábban savas vizes oldatot használtak, de manapság már az a tendencia, hogy lúgos elektrolitokat, például kálium-hidroxidot (KOH) alkalmaznak. Ez lehetővé teszi olyan anyagok használatát, amelyek olcsóbbak, mivel nincs szükség olyan mértékű korrózióálló tulajdonságra, mint savas oldat esetén. Klose et al. (2023) szerint a legelterjedtebb, alkáli elektrolitos elektrolízissel a 2020-as évek elején 1 kg hidrogén előállítása 50 kWh energiát igényel. A gáz tisztasága 99,8%-os vagy annál nagyobb. Léteznek nyomás alatt dolgozó elektrolizáló egységek is, amelyeknél az üzemi nyomás 6-200 bar. Ennek a nyomásértéknek nincs jelentős befolyása az energiafogyasztásra. Nagy energia- és viszonylag jelentős beruházásigénye miatt jelenleg a világ hidrogéntermelésének mindössze 4%-át adja az elektrolízissel előállított gáz. Éppen ezért, és mert a hidrogén ily módon történő előállítása jár a legkisebb környezeti terheléssel, napjainkban virágzik a nagy hatékonyságú elektrolizátorok kutatása és fejlesztése. Egyik módja az elektrolizáló egységek hatékonyságának javítására a folyamat hőmérsékletének növelése, ami csökkenti az elektrolízishez szükséges feszültséget. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy ilyenkor a berendezés gyártása drágább anyagokat igényel (Lymberopoulos et al. 2004, Klose et al. 2023).

2.2.2.2. 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. Ezzel az eljárással a földgázt gőzzel hidrogénre és szén-dioxidra bontják. A keletkező szén-dioxid tárolható is (CCS: szén-dioxid-

leválasztás és -tárolás), és felhasználható a későbbi ipari folyamatokban (CCU: szén-dioxid-leválasztás és -hasznosítás) (Karpilov, Pashchenko 2023; TÜV Rheinland 2023a).

2.2.2.3 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 kémiai kötött formában való tárolására is.

A nyomástartó hidrogéntartályok, illetve az egyéb tárolási lehetőségek kiválasztása a mobil vagy helyhez kötött tárolásra vonatkozó követelményektől, a felhasznált anyagok stabilitásától, a tárolni kívánt hidrogén mennyiségétől és a biztonsági szempontoktól függ. Környezeti körülmények között a hidrogén gáz halmazállapotú. A legkönnyebb elem, amelynek térfogati energiasűrűsége nagyon alacsony. Ennélfogva a hagyományos és az alternatív hidrogéntárolási lehetőségek összes előnye mellett jó néhány kihívással is szembesülünk ezen a területen. Az optimális hidrogéntárolási típus mindig az adott felhasználás függvénye. A gáz-halmazállapotú hidrogén adott térfogaton belül történő tárolásához azt jelentős mértékben össze kell sűríteni. A hidrogéngázt komoly kihívás visszatartani, hiszen a legkisebb réseken keresztül is kiszabadulhat. Lehetőség van nagymértékben csökkentett nyomáson, cseppfolyósított formában történő tárolásra is, azonban csak -253°C-os hőmérsékleten, ami folyamatos hűtést igényel (TÜV Rheinland 2023b).

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. 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 (úgynevezett stacionárius) tárolási feladatokra kevésbé alkalmazzák őket. A kompozitok nagy előnye a fém változatokkal szemben a sokkal kisebb tömeg (Breeze 2018), egyes változatoknak azonban hátránya, hogy mindig legalább 10 bar nyomást kell bennük fenntartani, így atmoszférikus nyomáson nem is szállíthatók. A sűrített hidrogéngáz palackos tárolásával összefüggésben széleskörű ipari tapasztalat van, de a 200 bar nyomás feletti tárolással kapcsolatban, a beruházási költségek nagysága és a biztonsági kérdések jelentősége miatt, számos akadály adódik. A 700 bar nyomáson történő sűrített gáztárolás egyelőre a lehető legfejlettebb megoldás (Dobránszky et al. 2022, TÜV Rheinland 2023b).

2.3.1.1. A hidrogéntartályok és -tartályok típusai gáznemű hidrogén tárolására

Öt különböző fajtájú nyomástartó edény létezik hidrogéngáz tárolására. A tárolási nyomás nemritkán több száz bar is lehet. A különböző nyomástartóedény-típusokat a technikai tartalomnak való megfelelés alapján használják. A legkisebb költségű az 1. típus, míg a legdrágább a legkorszerűbb 4. típusú tároló, amely sorozatgyártásban is előfordul.

1. kivitel:

A nagy nyomások és az emiatt létrejövő feszültségeloszlás, valamint a gyártási folyamat következtében minden, sorozatban gyártott hidrogéntároló nyomástartó edény hengeres kialakítású. Az ilyen típusú nyomástartó edény egy fém, jellemzően acél falból áll. Ezeknek a tartályoknak a névleges nyomása általában 200 bar körüli, és elterjedten alkalmazzák őket a gáziparban mind szállítás során, mind helyhez kötött alkalmazásoknál.

2. kivitel:

A 2. típusú kivitelűek a fémre felhordott, műgyantába ágyazott üvegszál vagy szénszál erősítésű köpenyből állnak. Itt a kompozitköpeny csak az edény hengeres részét veszi körül. Ez egyrészt valamelyest csökkenti a szerkezet tömegét a választható kisebb falvastagságoknak köszönhetően, másrészt akár 1000 bar nagyságrendig is teherbíró. A 2. kivitel leginkább helyhez kötött alkalmazásokban, például hidrogén-töltőállomásokon használják.

3. kivitel:

A 3. kivitelű nyomástartó edényeknek van egy bélése, amelyet fémből, leginkább alumíniumból készítenek. A palack hengeres részét főleg szénszál erősítésű kompozitköpennyel szokás körülvenni. A szénszálás kompozitburkolat viseli a terhelés túlnyomó részét. Ezt a fajtát nagy gravimetrikus energiatartalma különbözteti meg az 1. és 2. kivitelétől. Elsősorban hordozható alkalmazásoknál használják, például járművek üzemanyagcelláinál. A hordozható alkalmazások jellemző nyomása 350 bar vagy 700 bar. Lehet helyhez kötött alkalmazásoknál is találkozni vele, de az 1. és 2. kialakításokhoz képest nagyobb anyagköltsége miatt ritkábban.

4. kivitel:

A 4. kivitelű nyomástartó edény a legkorszerűbb, már sorozatgyártásban lévő tároló berendezés. A bélés műanyagból, leginkább poliamidból vagy polietilénből készül kompozitburkolattal, amelynek erősítőszálai jellemzően szénszálak. Ezzel a kialakítással további nyomáselőny biztosítható ennek a nyomástartó edénynek a három előző kivittel szemben. A 4. típusú nyomástartó edényeket hordozható és helyhez kötött alkalmazásokban is használják.

5. kivitel:

Erre a fajtára egyelőre nem jellemző a sorozatgyártás. Ez a nyomástartó edény nem rendelkezik béléssel, az egész szerkezet kompozitból készül (Dobránzky et al. 2022).

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 párologási 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. (Dobrászky et al. 2022, TÜV Rheinland 2023b).

2.3.3. Hidrogéngáz kémiailag 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 kötésén alapszanak.

2.3.3.1. Szilárd halmazállapotban történő tárolás

A hidrogén vegyületet képezhet egy fémmel vagy ötvözzel (fémhidriddel), amely lehetőséget ad a szilárd halmazállapotban történő tárolásra. Amikor a hidrogén érintkezik a tároló anyag felületével, a hidrogénmolekulák atomos hidrogénné bomlanak és behatolnak az anyagba. Hátránya ennek azonban az, hogy a tároló anyag tömege relatíve nagy a tárolt hidrogén mennyiségéhez képest (Dong et al. 2023).

2.3.3.2. Folyékony szerves hidrogénhordozók

A folyékony szerves hidrogénhordozók (LOHC) folyékony szerves hordozóközegben tárolják a hidrogént. A folyamat során a hidrogén kémiai kötéssel más anyaggá alakul. Ez teszi lehetővé a túlnyomás nélkül történő tárolást és a nagyobb mennyiségek szállítását akár szobahőmérsékleten is. A kémiai reakció megfordításával a hidrogén felszabadítható a hordozóból. Az LOHC rendszerek példái közé tartozik, többek között, a szerves anyagok hidrogénezése, az alkoholok szén-monoxiddal történő képzése, az olajokkal való összekapcsolás, vagy az ammónia alkalmazása a hidrogén hordozóanyagként (Arlt et al. 2012).

2.3.3.3. Metángázzá alakítás

Az előállított hidrogén egy következő lépésben metángázzá is alakítható, s így tárolható. Ez a metángáz alkalmas arra, hogy betáplálják a gázhálózatba és eljuttassák a fogyasztókhoz.

Más megoldásként gáztárolókban is tárolható. A szintetikus metán (SNG) előállítása folyamán melléktermékként hő és víz keletkezik (TÜV Rheinland 2023a).

A hidrogén előállításának és tárolásának irodalmi áttekintése után a diplomamunka 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. Ide sorolható a mocsarak tömődött alja, a trágyarakások belseje, a szemétdéponiák, valamint a szarvasmarha bendője is. A biogáz különböző szerves, megújuló anyagok oxigéntől nem tökéletesen elzárt erjedésének eredményeként, baktériumok segítségével jön létre. 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 mezofil rendszer alkalmazása kóros véglényekben szegény, relatíve egyöntetű alapanyagból álló, nagyobb hely- és gázfelhasználási lehetőségekkel rendelkező esetben célszerű. A termofil zónában való üzemeltetés akkor indokolt, ha az alapanyagban a

későbbi trágyafelhasználásnál káros kórokozók előfordulása lehetséges, illetve a fermentációt gyorsan kell megvalósítani, akár nagyobb energiaveszteségek árán is (Anand et al. 2023, Nagy 2010).

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 nagy nyomású 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.

2.5.1. Alacsony nyomású biogáztárolás

A rothasztón lebegő biogáztárolók jelentik az alacsony nyomású tárolási lehetőséget. Ezek a rendszerek általában 0,14 bar alatti túlnyomáson működnek. A tárolók készülhetnek acélból, üvegszálból vagy rugalmas szövetből is. A fermentátum és a nyers biogáz tárolására egy különálló, ehhez hasonló tartály használható. A beépített gáztároló elemmel rendelkező rothasztó fő előnye a rendszer alacsonyabb költsége.

A legolcsóbb és legegyszerűbb gáztároló a rugalmas, felfújható szövetből, mivel nem lép reakcióba a biogázban lévő kén-hidrogénnel, és a rothasztó szerves része. Az ilyen típusú burkolatokat gyakran használják különféle rothasztókhoz.

Az alacsony nyomású gáztárolókhoz általában használt rugalmas membránanyagok közé tartozik a nagy sűrűségű polietilén (HDPE), a kis sűrűségű polietilén (LDPE), a lineáris kis

sűrűségű polietilén (LLDPE) és a klórszulfonált polietilénnel bevont poliészter is. A fedőanyagok vastagsága általában 0,5 és 2,5 milliméter között változik.

2.5.2. Közepes nyomású biogáztárolás

A biogáz 0,14 és 14 bar közötti közepes nyomáson is tárolható. A tartály alkatrészei korróziójának megelőzése és a biztonságos működés érdekében a biogázt először meg kell tisztítani kén-hidrogén-tartalmától. Ezután a megtisztított biogázt enyhén össze kell sűríteni a tartályokban való tárolás előtt.

2.5.2. Magas nyomású biogáztárolás

A gáz 140 és 350 bar közötti nagy nyomásra történő sűrítésének költsége sokkal magasabb, mint a közepes nyomású tároláshoz történő sűrítése. A magas költségek miatt ezt a tárolási formát elsősorban csak akkor használják, amikor a biogázt biometánná alakítják át. Mivel az ilyen tüzelőanyag előállítási mennyisége jellemzően meghaladja az azonnali helyszíni igényt, a biometánt a jövőbeni felhasználáshoz tárolni kell, általában sűrített biometánként (CBM) vagy cseppfolyósított biometánként (LBM). Az LBM két fő előnye, hogy viszonylag könnyen szállítható, és akár LNG, akár CNG járművekbe adagolható. A folyékony biometánt ugyanúgy szállítják, mint az LNG-t, vagyis a kriogén folyadékok szállítására tervezett szigetelt tartálykocsikban. A helytakarékoság érdekében a biometán CBM-ként tárolható. A gázt acélpalackokban tárolják, például olyanokban, amelyeket általában más kereskedelmi forgalomban kapható gázok tárolására használnak (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. A berendezés fő egységei a motorblokk (amely a dugattyús, gázüzemű belső égésű motor, a tulajdonképpeni gázmotor), a generátor és a vezérlés.

A villamosenergia-előállítás során, néhány kivételt leszámítva, nagy mennyiségű termikus energia is képződik. Ebből következik, hogy akár akarjuk, akár nem, hőt is állítunk elő (Dong et al. 2023). Kérdés, hogy tudjuk-e ezt a mellékterméket hasznosítani? A kapcsolt energiatermelésnek pontosan ez a lényege: egyféle alapanyag felhasználásával többféle hasznosítható energia előállítása. A berendezés akkor válik kapcsolt energiatermelővé, mikor a motor köpenyén, a kenőolajban és a füstgázban megjelenő hő elvonásra és hasznosításra kerül. Ez leggyakrabban meleg víz formájában történik, de létezik közvetlen gőzelőállítás is. Kapcsolt energiatermelésben használt gázmotoros kiserőmű felépítménye tartalmazza a motorblokkot, a generátort, a vezérlést, a hőcserélőket és egy zajvédő burkolatot. A méretezésnél fontos a következők figyelembevétele:

- villamosenergia-fogyasztás nagysága és időbeni lefutása;
- hőigény nagysága és időbeni lefutása.

A gázmotoroknak műszaki szempontból a legmegfelelőbb, ha minél többet és minél közelebb üzemelnek névleges teljesítményükhöz. Gazdaságossági szempontból szintén ez az előnyös. Ezt a szempontot fontos szem előtt tartani kiválasztásukkor.

A kapcsolt energiatermelés azért jelentős kérdés, mert a gázmotoroknál legjobb esetben is csak 50-50% a megtermelt villamos energia és hőenergia aránya (kisebb teljesítményű egységeknél még ennél is kisebb a villamos energia részaránya). Emiatt a csupán villamos energia termelésére használt gázmotornál nagy a veszteség. Kapcsolt energiatermeléssel ez

jelentősen csökkenthető, ezért, ha erre van lehetőség, érdemes megvalósítani a kogenerációt.

A gázmotorok telepítésénél figyelembe kell venni többek között a rezgést, a zajhatást és a csatlakozási pontok távolságát. A gázmotoros kiserőművek megtervezésénél további probléma lehet az, hogy a fűtési idényt leszámítva nincs nagyobb hőigény. Ezen probléma egyik lehetséges megoldása a motor szakaszos üzemeltetése. A másik lehetőség a hő átalakítása hidegenergiává adszorpció vagy abszorpció hűtőgép segítségével. Az ilyen berendezések képesek meleg víz felhasználásával általában 7-12°C-os víz előállítására, amit hűtőrendszerekben közvetlenül fel lehet használni. Ezt nevezzük trigenerációnak (Szauter 2009).

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. 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. Ezek közül hármat szeretnék bemutatni.

2.8.1. Alkálikus üzemanyagcella

Az alkálikus üzemanyagcella a legelső tüzelőanyag-cella változatok közé tartozik, amelyeket már az 1960-as években is használtak. Az elektrolit olcsó, általában kálium-hidroxid vagy nátrium-hidroxid. Hatásfokuk kiváló, a katalizátoruk sem túl költséges, így az egész cella költsége sem túl nagy. Legnagyobb hátrányuk, hogy érzékenyek a széndioxidra, ezért nagyon tiszta input gázokat igényelnek. Emiatt napjainkban jelentőségük csekély, ritkán alkalmazzák őket (Gülzow, Schulze 2008).

2.8.2. Protoncserélő-membrános üzemanyagcella

A protoncserélő-membrános üzemanyagcellák egy 1,0 mm-nél vékonyabb, hidratált protoncserélő membránt tartalmaznak, ami csak a hidrogén-ionokat engedi át. A membránt mindkét oldalán katalizátorral, jellemzően platinával vonják be. A hidrogént és az oxigént (levegőt) a membrán két ellentétes oldalán juttatják a cellába. A hidrogénből létrejövő hidrogén-ionok a membránon áthaladva, annak másik oldalán az oxigénredukció termékével, a hidroxidionokkal vízzé egyesülnek. A protoncserélő-membrános cellák előnyös alkalmazhatók gyorsan és gyakran változó üzemi körülmények között. Jelenlegi legnagyobb hátránya a platina viszonylag magas költsége. Ennek ellenére napjainkban ez a legelterjedtebb változat, amiben nagy, akár 60 %-os hatásfoka is szerepet játszik (Han et al. 2023).

2.8.3. Szilárd-oxidos üzemanyagcella

A szilárd-oxidos üzemanyag-cella egy nagy hőmérsékleten (500-1000°C) üzemelő tüzelőanyag-cella fajta, amelyben az elektrolitot szilárd, porózus kerámia képezi. Ehhez a cellához nem szükséges drága katalizátor, azonban a nagy hőmérsékletet kibíró anyagokból kell, hogy készüljön. A típus lassú teljesítményváltoztatásokra képes, beüzemelési ideje viszonylag hosszú, de villamos hatásfoka igen kedvező. Az előzőekből következik, hogy elsősorban telepített energiatermelésre használják. Teljesítménytartománya néhány kW-tól több MW-ig terjedhet. Ideális lehet kapcsolt energiatermelésre is, nagy eredő hatásfokkal. A nagy hőmérsékleten történő működés következménye, hogy az üzemanyagcella lehetővé teszi belső reformálási reakciók lezajlását is. Emiatt nem szükséges tiszta hidrogén az üzemeltetéshez, szénhidrogének is alkalmazhatók. Kevésbé érzékeny az input anyagokban található szennyezésekre. Jellemzője továbbá a hosszú élettartam. Viszonylag új típusról van szó, amelynek beruházási költsége folyamatosan csökken, így egyre népszerűbbé válik (MHT 2023).

3. Anyag és módszer

A diplomamunka 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 lábás, 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 lábás, 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)



1. ábra Szabványos, magasított 40 lábas konténer (ModuGo 2023)

A konténer tetejére kerülnek a napelemek. A rendelkezésre álló felület összesen 29,72 m². Három lehetőséget vizsgálok meg, amelyek közül kiválasztom a legmegfelelőbbet. A versenyeztetés szempontjait, a tulajdonságok súlyozását és értékelését a 2. táblázat tartalmazza. 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. Ezek minden versenyeztetésnél igazak. A darab értékelésénél az kap nagyobb pontszámot, amelyből több helyezhető el a konténeren. Az erre vonatkozó részletes számítás, a győztes változattal elvégezve, az Eredmények fejezetben található. A tömegnél a kisebb tömegűnek jár a nagyobb pontszám. Az összpontszám a súlyszámok és az értékszámok szorzatösszege.

2. táblázat A napelemek versenyztetése a 40 lábas konténernél

	Darab	Darab ár	Teljes ár (4)	Csúcstelje sítmény	Összesúcstel 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 $0,27 \text{ (N)m}^3$ hidrogént tud óránként előállítani, $6,1 \text{ kWh/(N)m}^3$ energiafogyasztás mellett. Ez $0,024 \text{ kg/h}$ -ás termelési volumet jelent. 1 kg gáz előállítása pedig $67,8 \text{ kWh}$ 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 Mahtec (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.



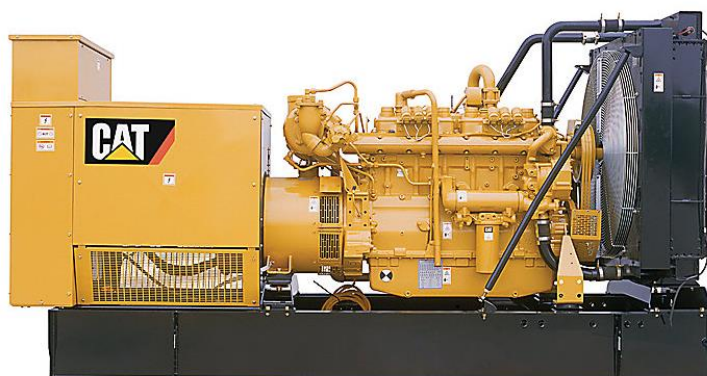
4. ábra 850 literes hidrogéntartályok (Mahytec 2023)

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 háromszázszorosát. 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 összhatásfok 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 háromezszázszorosát. 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 lábás, 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 lábás 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 versenyztetést az első változatnál megismert módon (4. táblázat).

4. táblázat A napelemek versenyztetése a 20 lábas konténernél

	Darab	Darab ár	Teljes ár (4)	Csúcstelje sítmény	Összcscstel 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 csúcsteljesítménye 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.

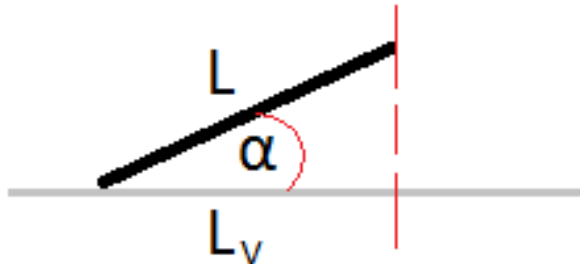
4. Eredmények

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.

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

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 7891,2 kg, amely messze elmarad a tároló 50 tonnás terhelhetőségétől.

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

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 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.

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

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

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 MJ = 3861,25 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:

- $E_{H\text{össz}}$ 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 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:

- $E_{össz}$ az egy év alatt előállított gázkeverék energiatartalma
- $E_{Hössz}$ az egy év alatt előállított hidrogén energiatartalma
- $E_{bgössz}$ 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.

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

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, hat napig kell az elektrolizálónak működnie, és a keletkező hidrogént mind a tartályokba kell gyűjteni. Ez a következő számításból látható:

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

ahol:

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

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

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

ahol:

- $W_{1\text{nap}}$ az egy napnyi raktározással nyerhető villamos energia
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $P_{\text{gáz}}$ a gázelegy teljesítménye
- $t_{1\text{nap}}$ 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)m^3 egy tonna szubsztrátumból (Galyas, Szunyog 2018). A biogáz összetételéből adódó sűrűsége $1,17 \text{ kg/(N)m}^3$, amelyet az alábbi számítás mutat.

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

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.

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

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.

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

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.

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

ahol:

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

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

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.

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

ahol:

- $m_{tbgössz}$ 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

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

ahol:

- d_{bg} a napok száma
- $m_{tbgössz}$ 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 biogáztöbbséggel 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:

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

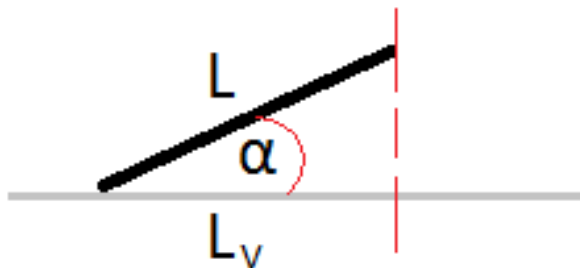
ahol:

- 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 lábás, 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:

- $m_{tHössz}$ 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 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 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

- $E_{Hössz}$ az egy év alatt előállított hidrogén energiatartalma
- $E_{bgössz}$ 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 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.

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

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:

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

ahol:

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

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

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

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

$$= 0,315 \cdot 504 \text{ kg} \cdot \left(0,05 \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} + 0,95 \cdot 0,65 \cdot 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = 5854,3 \text{ MJ}$$

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.

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

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:

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

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-cellára 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

4.2.1. Az első változat

A konténer bekerülési költsége:

$$K_{kon} = 1968500 \text{ Ft}$$

A tároló tetején elhelyezhető napelemek számából és egységárából a panelek ára:

$$K_{nap} = n \cdot E_{nap} = 14 \cdot 124734 \text{ Ft} = 1746276 \text{ Ft}$$

ahol:

- K_{nap} a panelek ára összesen
- n a napelemek darabszáma
- E_{nap} a napelem egységára

Az elektrolizáló bekerülési költsége:

$$K_{el} = 815000 \text{ Ft}$$

A hidrogéntartályok számából és egységárából következően a tartályok összköltsége:

$$K_{ht} = n_t \cdot E_{ht} = 30 \cdot 408000 \text{ Ft} = 12240000 \text{ Ft}$$

ahol:

- K_{ht} a hidrogéntartályok összköltsége
- n_t tartályok száma
- E_{ht} a hidrogéntartályok egységára

A gázmotoros kiserőmű bekerülési költsége:

$$K_{gm} = 2788000 \text{ Ft}$$

Az előzőek alapján a berendezés beruházási költsége:

$$\begin{aligned} K_{össz} &= K_{kon} + K_{nap} + K_{el} + K_{ht} + K_{gm} = \\ &= 1968500 \text{ Ft} + 1746276 \text{ Ft} + 815000 \text{ Ft} + 12240000 \text{ Ft} + 2788000 \text{ Ft} = \\ &= 19557776 \text{ Ft} \end{aligned}$$

ahol:

- $K_{össz}$ a berendezés beruházási költsége
- K_{kon} a konténer ára
- K_{nap} a panelek ára összesen
- K_{el} az elektrolizáló ára
- K_{ht} a hidrogéntartályok összköltsége
- K_{gm} a gázmotoros kiserőmű ára

A jelenlegi, 2023. május 1-től hatályos piaci ár szerint 1 kWh villamos energia 70,1039 Ft-ba kerül, lakossági és nem lakossági fogyasztóknak egyaránt (MVM 2023b). Ez alapján a rendszer bekerülési költsége 278982,71 kWh villamos energia árával egyezik meg.

$$W_{Kössz} = \frac{K_{össz}}{E_{ve}} = \frac{19557776 \text{ Ft}}{70,1039 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}}} = 278982,71 \text{ kWh}$$

ahol:

- $W_{Kössz}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége

- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége
- E_{ve} 1 kWh villamos energia piaci ára

Az energetikai számítások alapján a rendszer ennyi villamos energiát 37,3 év alatt tud előállítani.

$$t_{\text{megt}} = \frac{W_{\text{Kössz}}}{\eta_{\text{vm}} \cdot P_{\text{gáz}} \cdot 24 \cdot 365} = \frac{278982,71 \text{ kWh}}{0,315 \cdot 2,70903 \text{ kW} \cdot 24 \cdot 365} = 37,3 \text{ év}$$

ahol:

- t_{megt} a megtérülési idő
- $W_{\text{Kössz}}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $P_{\text{gáz}}$ a gázelegy teljesítménye

Ez azt jelenti, hogy az energiatermelő és -tároló berendezés több, mint 37 év alatt térülne meg, ami olyan nagy idő, hogy ebben a formában nem éri meg megvalósítani. A költségek azonban könnyedén mérsékelhetők a hidrogéntartályok számának csökkentésével. Erre azért van lehetőség, mert korábban csak azt vettem figyelembe, hogy a konténer minél jobban ki legyen töltve, a költségeket nem. Emiatt a hidrogéntároló-kapacitás óriási, a rendszer több mint egy év alatt megtermelhető gáz tárolására képes, amely nem szükséges. A tartályok árából látszik, hogy a beruházási költség nagy részét ez teszi ki. Az előzőekből következően tehát nemcsak lehetséges, de szükséges is a tartályok számának csökkentése.

Ha három darab tartályt helyezünk el a konténerben, akkor az alábbi számítás alapján majdnem negyven napnyi hidrogént tudunk tárolni, amely elegendő mennyiség.

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

ahol:

- $m_{\text{tHössz}}$ 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

Három hidrogéntartály ára:

$$K_{ht} = n_t \cdot E_{ht} = 3 \cdot 408000 \text{ Ft} = 1224000 \text{ Ft}$$

ahol:

- K_{ht} a hidrogéntartályok összköltsége
- n_t tartályok száma
- E_{ht} a hidrogéntartályok egységára

Ebből a csökkentett beruházási költség:

$$\begin{aligned} K_{össz} &= K_{kon} + K_{nap} + K_{el} + K_{ht} + K_{gm} = \\ &= 1968500 \text{ Ft} + 1746276 \text{ Ft} + 815000 \text{ Ft} + 1224000 \text{ Ft} + 2788000 \text{ Ft} = \\ &= 8541776 \text{ Ft} \end{aligned}$$

ahol:

- $K_{össz}$ a berendezés beruházási költsége
- K_{kon} a konténer ára
- K_{nap} a panelek ára összesen
- K_{el} az elektrolizáló ára
- K_{ht} a hidrogéntartályok összköltsége
- K_{gm} a gázmotoros kiserőmű ára

Ez 121844,52 kWh villamos energia árával egyezik meg.

$$W_{Kössz} = \frac{K_{össz}}{E_{ve}} = \frac{8541776 \text{ Ft}}{70,1039 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}}} = 121844,52 \text{ kWh}$$

ahol:

- $W_{Kössz}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége
- $K_{össz}$ a berendezés beruházási költsége
- E_{ve} 1 kWh villamos energia piaci ára

A rendszer ennyi villamos energiát 16,3 év alatt tud előállítani.

$$t_{megt} = \frac{W_{Kössz}}{\eta_{vm} \cdot P_{gáz} \cdot 24 \cdot 365} = \frac{121844,52 \text{ kWh}}{0,315 \cdot 2,70903 \text{ kW} \cdot 24 \cdot 365} = 16,3 \text{ év}$$

ahol:

- t_{megt} a megtérülési idő
- $W_{Kössz}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $P_{gáz}$ a gázelegy teljesítménye

A megtérülési idő 16,3 évre csökkent, ami, ha figyelembe vesszük az inflációt és a villamos energia árának várható növekedését, a részegységek árának várható csökkenését, és az állami támogatás lehetőségét, már reálissá teheti a berendezés megvalósítását gazdasági szempontból is.

Végül meghatározom az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költséget, és az 1kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költséget a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén, hogy a különböző változatok összehasonlítása könnyebb legyen.

$$K_{fajP} = \frac{K_{össz}}{\eta_{vm} \cdot P_{gáz}} = \frac{8541776 \text{ Ft}}{0,315 \cdot 2,70903 \text{ kW}} = 10009763 \frac{\text{Ft}}{\text{kW}}$$

ahol:

- K_{fajP} az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség
- $K_{össz}$ a berendezés beruházási költsége
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $P_{gáz}$ a gázelegy teljesítménye

$$K_{fajW} = \frac{3,6 \cdot K_{össz}}{\eta_{vm} \cdot \left(m_{tHössz} \cdot Q_H + 0,65 \cdot \frac{95}{5} \cdot m_{tHössz} \cdot Q_{CH_4} \right)} =$$

$$= \frac{3,6 \cdot 8541776 \text{ Ft}}{0,315 \cdot \left(12,6 \text{ kg} \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} + 0,65 \cdot \frac{95}{5} \cdot 12,6 \text{ kg} \cdot 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)} = 10505 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}}$$

ahol:

- K_{fajW} az 1 kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén
- $K_{össz}$ a berendezés beruházási költsége
- 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

Ezen változat költségei tehát a fentiek szerint alakulnak, azonban ez a konstrukció csak ott tud működni, ahol a biogáz más forrásból megfelelő mennyiségben rendelkezésre áll.

4.2.2. A második változat

A második változat az elsőtől annyiban tér el, hogy a konténerben található a biogázt előállító fermentor és az azt tároló gáztartályok is. A beruházási költség tehát ezek árával növekszik, mivel itt a hidrogéntartályok száma ugyanannyi, mint a módosított első változatnál, és minden más is megegyezik. A biogáztartályok ára:

$$K_{tbg} = n_{tbg} \cdot E_{tbg} = 18 \cdot 2720000 \text{ Ft} = 48960000 \text{ Ft}$$

ahol:

- K_{tbg} a biogáztartályok költsége
- n_{tbg} tartályok száma
- E_{tbg} egy tartály ára

Ez a hatalmas költség egészen biztosan megvalósíthatatlanná teszi ezt a változatot, azonban itt is van lehetőség a biogáztartályok számának csökkentésére. A 18 tartály összesen 58 napnyi mennyiséget képes tárolni. Ebből következik, hogy 13 tartály közel 42 nap alatt megtermelhető hidrogénhez szükséges biogáz tárolására képes. Mivel összesen 40 napnyi hidrogént tudunk tárolni, ezért ez elegendő. Így a költségek az alábbiak szerint csökkennek:

$$K_{tbg} = n_{tbg} \cdot E_{tbg} = 13 \cdot 2720000 \text{ Ft} = 35360000 \text{ Ft}$$

ahol:

- K_{tbg} a tartályok költsége
- n_{tbg} tartályok száma
- E_{tbg} egy tartály ára

A beruházási költség tehát a fermentor nélkül:

$$\begin{aligned} K_{\text{össz}} &= K_{kon} + K_{nap} + K_{el} + K_{ht} + K_{gm} + K_{tbg} = \\ &= 1968500 \text{ Ft} + 1746276 \text{ Ft} + 815000 \text{ Ft} + \\ &+ 1224000 \text{ Ft} + 2788000 \text{ Ft} + 35360000 \text{ Ft} = \\ &= 43901776 \text{ Ft} \end{aligned}$$

ahol:

- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége
- K_{kon} a konténer ára
- K_{nap} a panelek ára összesen
- K_{el} az elektrolizáló ára

- K_{ht} a hidrogéntartályok összköltsége
- K_{gm} a gázmotoros kiserőmű ára
- K_{tbg} a biogáztartályok költsége

Ez 626238,71 kWh villamos energia árával egyezik meg.

$$W_{Kössz} = \frac{K_{össz}}{E_{ve}} = \frac{43901776 \text{ Ft}}{70,1039 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}}} = 626238,71 \text{ kWh}$$

ahol:

- $W_{Kössz}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége
- $K_{össz}$ a berendezés beruházási költsége
- E_{ve} 1 kWh villamos energia piaci ára

A rendszer ennyi villamos energiát 83,8 év alatt tud előállítani.

$$t_{megt} = \frac{W_{Kössz}}{\eta_{vm} \cdot P_{gáz} \cdot 24 \cdot 365} = \frac{626238,71 \text{ kWh}}{0,315 \cdot 2,70903 \text{ kW} \cdot 24 \cdot 365} = 83,8 \text{ év}$$

ahol:

- t_{megt} a megtérülési idő
- $W_{Kössz}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $P_{gáz}$ a gázelegy teljesítménye

Végül az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség, és az 1kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén:

$$K_{fajP} = \frac{K_{össz}}{\eta_{vm} \cdot P_{gáz}} = \frac{43901776 \text{ Ft}}{0,315 \cdot 2,70903 \text{ kW}} = 51446724 \frac{\text{Ft}}{\text{kW}}$$

ahol:

- K_{fajP} az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség
- $K_{össz}$ a berendezés beruházási költsége
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $P_{gáz}$ a gázelegy teljesítménye

$$K_{fajW} = \frac{3,6 \cdot K_{össz}}{\eta_{vm} \cdot \left(m_{tHössz} \cdot Q_H + 0,65 \cdot \frac{95}{5} \cdot m_{tHössz} \cdot Q_{CH_4} \right)} =$$
$$= \frac{3,6 \cdot 43901776 \text{ Ft}}{0,315 \cdot \left(12,6 \text{ kg} \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} + 0,65 \cdot \frac{95}{5} \cdot 12,6 \text{ kg} \cdot 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)} = 53992 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}}$$

ahol:

- K_{fajW} az 1 kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén
- $K_{össz}$ a berendezés beruházási költsége
- 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 költségek még mindig túl magasak, további költségcsökkentésre pedig nincs lehetőség. Fontos megemlíteni, hogy ehhez még a fermentor ára is hozzáadódik, ami további jelentős költségnövekedést jelent. A fermentor ára nélkül a megtérülési idő 83,8 év. A konstrukció tehát műszakilag megvalósítható, de gazdaságilag semmiképpen sem.

4.2.3. A harmadik változat

A harmadik változat az elsőtől annyiban különbözik, hogy a gázmotoros kiserőművet lecseréljük hidrogén-tüzelőanyagcellára. Az első változat gazdasági számításaiban említett

okoknál fogva itt is háromra csökkentjük a hidrogéntartályok számát. A tüzelőanyag-cella ára:

$$K_{tc} = 1462000 \text{ Ft}$$

Így a beruházási költség:

$$\begin{aligned} K_{\text{össz}} &= K_{\text{kon}} + K_{\text{nap}} + K_{\text{el}} + K_{\text{ht}} + K_{\text{tc}} = \\ &= 1968500 \text{ Ft} + 1746276 \text{ Ft} + 815000 \text{ Ft} + \\ &\quad + 1224000 \text{ Ft} + 1462000 \text{ Ft} = \\ &= 7215776 \text{ Ft} \end{aligned}$$

ahol:

- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége
- K_{kon} a konténer ára
- K_{nap} a panelek ára összesen
- K_{el} az elektrolizáló ára
- K_{ht} a hidrogéntartályok összköltsége
- K_{tc} az üzemanyagcella ára

Ez 102929,74 kWh villamos energia árával egyezik meg.

$$W_{K_{\text{össz}}} = \frac{K_{\text{össz}}}{E_{ve}} = \frac{7215776 \text{ Ft}}{70,1039 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}}} = 102929,74 \text{ kWh}$$

ahol:

- $W_{K_{\text{össz}}}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége
- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége
- E_{ve} 1 kWh villamos energia piaci ára

A rendszer ennyi villamos energiát 49,4 év alatt tud előállítani.

$$t_{megt} = \frac{W_{K_{\text{össz}}}}{\eta_{tc} \cdot P_H \cdot 24 \cdot 365} = \frac{102929,74 \text{ kWh}}{0,54 \cdot 0,4403 \text{ kW} \cdot 24 \cdot 365} = 49,4 \text{ év}$$

ahol:

- t_{megt} a megtérülési idő
- $W_{K_{\text{össz}}}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége
- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka
- P_H a hidrogén teljesítménye

Végül az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség, és az 1kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén:

$$K_{fajP} = \frac{K_{\text{össz}}}{\eta_{tc} \cdot P_H} = \frac{7215776 \text{ Ft}}{0,54 \cdot 0,4403 \text{ kW}} = 30348735 \frac{\text{Ft}}{\text{kW}}$$

ahol:

- K_{fajP} az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség
- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége
- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka
- P_H a hidrogén teljesítménye

$$K_{fajW} = \frac{3,6 \cdot K_{\text{össz}}}{\eta_{tc} \cdot m_{tH_{\text{össz}}} \cdot Q_H} =$$

$$= \frac{3,6 \cdot 7215776 \text{ Ft}}{0,54 \cdot 12,6 \text{ kg} \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 31816 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}}$$

ahol:

- K_{fajW} az 1 kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén
- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége

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

A számított költségek alapján jelenleg ez a változat sem gazdaságos, azonban egyszerűsége, a technológia fejlődése és a részegységek árainak várható csökkenése a jövőben azzá teheti.

4.2.4. A negyedik változat

A negyedik az első kisméretű változata. A konténer bekerülési költsége:

$$K_{kon} = 1250000 \text{ Ft}$$

A tároló tetején elhelyezhető napelemek számából és egységárából a panelek ára:

$$K_{nap} = n \cdot E_{nap} = 6 \cdot 124384 \text{ Ft} = 746304 \text{ Ft}$$

ahol:

- K_{nap} a panelek ára összesen
- n a napelemek darabszáma
- E_{nap} a napelem egységára

Az elektrolizáló bekerülési költsége ugyanannyi, mint az első változatnál:

$$K_{el} = 815000 \text{ Ft}$$

Eredetileg hat hidrogéntartályt használtunk, azonban a korábban már említett okok miatt ezeket itt is háromra csökkentjük. A hidrogéntartályok számából és egységárából következően a tartályok összköltsége:

$$K_{ht} = n_t \cdot E_{ht} = 3 \cdot 408000 \text{ Ft} = 1224000 \text{ Ft}$$

ahol:

- K_{ht} a hidrogéntartályok összköltsége
- n_t tartályok száma

- E_{ht} a hidrogéntartályok egységára

A gázmotoros kiserőmű bekerülési költsége:

$$K_{gm} = 2788000 \text{ Ft}$$

Az előzőek alapján a berendezés beruházási költsége:

$$\begin{aligned} K_{\text{össz}} &= K_{\text{kon}} + K_{\text{nap}} + K_{\text{el}} + K_{\text{ht}} + K_{\text{gm}} = \\ &= 1250000 \text{ Ft} + 746304 \text{ Ft} + 815000 \text{ Ft} + 1224000 \text{ Ft} + 2788000 \text{ Ft} = \\ &= 6823304 \text{ Ft} \end{aligned}$$

ahol:

- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége
- K_{kon} a konténer ára
- K_{nap} a panelek ára összesen
- K_{el} az elektrolizáló ára
- K_{ht} a hidrogéntartályok összköltsége
- K_{gm} a gázmotoros kiserőmű ára

Ez 97331,3 kWh villamos energia árával egyezik meg.

$$W_{K_{\text{össz}}} = \frac{K_{\text{össz}}}{E_{ve}} = \frac{6823304 \text{ Ft}}{70,1039 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}}} = 97331,3 \text{ kWh}$$

ahol:

- $W_{K_{\text{össz}}}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége
- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége
- E_{ve} 1 kWh villamos energia piaci ára

A rendszer ennyi villamos energiát 28,2 év alatt tud előállítani.

$$t_{\text{megt}} = \frac{W_{\text{Kössz}}}{\eta_{\text{vm}} \cdot P_{\text{gáz}} \cdot 24 \cdot 365} = \frac{97331,3 \text{ kWh}}{0,315 \cdot 1,25208 \text{ kW} \cdot 24 \cdot 365} = 28,2 \text{ év}$$

ahol:

- t_{megt} a megtérülési idő
- $W_{\text{Kössz}}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $P_{\text{gáz}}$ a gázelegy teljesítménye

Végül az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség, és az 1kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén:

$$K_{\text{fajP}} = \frac{K_{\text{össz}}}{\eta_{\text{vm}} \cdot P_{\text{gáz}}} = \frac{6823304 \text{ Ft}}{0,315 \cdot 1,25208 \text{ kW}} = 17300238 \frac{\text{Ft}}{\text{kW}}$$

ahol:

- K_{fajP} az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség
- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége
- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $P_{\text{gáz}}$ a gázelegy teljesítménye

$$K_{\text{fajW}} = \frac{3,6 \cdot K_{\text{össz}}}{\eta_{\text{vm}} \cdot \left(m_{\text{tHössz}} \cdot Q_{\text{H}} + 0,65 \cdot \frac{95}{5} \cdot m_{\text{tHössz}} \cdot Q_{\text{CH4}} \right)} =$$

$$= \frac{3,6 \cdot 6823304 \text{ Ft}}{0,315 \cdot \left(12,6 \text{ kg} \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} + 0,65 \cdot \frac{95}{5} \cdot 12,6 \text{ kg} \cdot 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)} = 8392 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}}$$

ahol:

- K_{fajW} az 1 kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén
- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége

- η_{vm} a gázmotor villamos hatásfoka
- $m_{H_{össz}}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- Q_H a hidrogén fűtőértéke
- Q_{CH_4} a metán fűtőértéke

Ha a költségeket összehasonlítjuk az első változat költségeivel, akkor látható, hogy ennek a változatnak is lehet létjogosultsága gazdasági szempontból, azonban az első változat összességében előnyösebb, így háttérbe szorítja ezt a megoldást.

4.2.5. Az ötödik változat

Az ötödik változat a tüzelőanyag-cellás kisméretű változata. A negyedikhez képest a különbség a gázmotor lecserélése az üzemanyagcellára. A tüzelőanyag-cella bekerülési költsége:

$$K_{tc} = 1462000 Ft$$

Az eredeti tizenöt helyett itt is három tartályt használva a tartályok összköltsége:

$$K_{ht} = n_t \cdot E_{ht} = 3 \cdot 408000 Ft = 1224000 Ft$$

ahol:

- K_{ht} a hidrogéntartályok összköltsége
- n_t tartályok száma
- E_{ht} a hidrogéntartályok egységára

Az előzőek alapján a berendezés beruházási költsége:

$$\begin{aligned} K_{össz} &= K_{kon} + K_{nap} + K_{el} + K_{ht} + K_{tc} = \\ &= 1250000 Ft + 746304 Ft + 815000 Ft + 1224000 Ft + 1462000 Ft = \\ &= 5497304 Ft \end{aligned}$$

ahol:

- $K_{össz}$ a berendezés beruházási költsége

- K_{kon} a konténer ára
- K_{nap} a panelek ára összesen
- K_{el} az elektrolizáló ára
- K_{ht} a hidrogéntartályok összköltsége
- K_{tc} az üzemanyagcella ára

Ez 78416,52 kWh villamos energia árával egyezik meg.

$$W_{Kössz} = \frac{K_{össz}}{E_{ve}} = \frac{5497304 \text{ Ft}}{70,1039 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}}} = 78416,52 \text{ kWh}$$

ahol:

- $W_{Kössz}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége
- $K_{össz}$ a berendezés beruházási költsége
- E_{ve} 1 kWh villamos energia piaci ára

A rendszer ennyi villamos energiát 81,2 év alatt tud előállítani.

$$t_{megt} = \frac{W_{Kössz}}{\eta_{tc} \cdot P_H \cdot 24 \cdot 365} = \frac{78416,52 \text{ kWh}}{0,54 \cdot 0,20417 \text{ kW} \cdot 24 \cdot 365} = 81,2 \text{ év}$$

ahol:

- t_{megt} a megtérülési idő
- $W_{Kössz}$ a beruházási költségből vásárolható villamos energia mennyisége
- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka
- P_H a hidrogén teljesítménye

Végül az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség, és az 1kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén:

$$K_{fajP} = \frac{K_{\text{össz}}}{\eta_{tc} \cdot P_H} = \frac{5497304 \text{ Ft}}{0,54 \cdot 0,20417 \text{ kW}} = 49861354 \frac{\text{Ft}}{\text{kW}}$$

ahol:

- K_{fajP} az 1 kW villamos teljesítményre eső fajlagos beruházási költség
- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége
- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka
- P_H a hidrogén teljesítménye

$$K_{fajW} = \frac{3,6 \cdot K_{\text{össz}}}{\eta_{tc} \cdot m_{tH\text{össz}} \cdot Q_H} =$$

$$= \frac{3,6 \cdot 5497304 \text{ Ft}}{0,54 \cdot 12,6 \text{ kg} \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 24239 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}}$$

ahol:

- K_{fajW} az 1 kWh tárolt villamos energiára eső fajlagos beruházási költség a legnagyobb tárolható energiamennyiség esetén
- $K_{\text{össz}}$ a berendezés beruházási költsége
- η_{tc} a tüzelőanyag-cella hatásfoka
- $m_{tH\text{össz}}$ az összes tartály által tárolni képes hidrogén tömege
- Q_H a hidrogén fűtőértéke

A jelenlegi körülmények között ez a változat sem bizonyult gazdaságosnak.

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 költségből 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 találhatóak, 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.

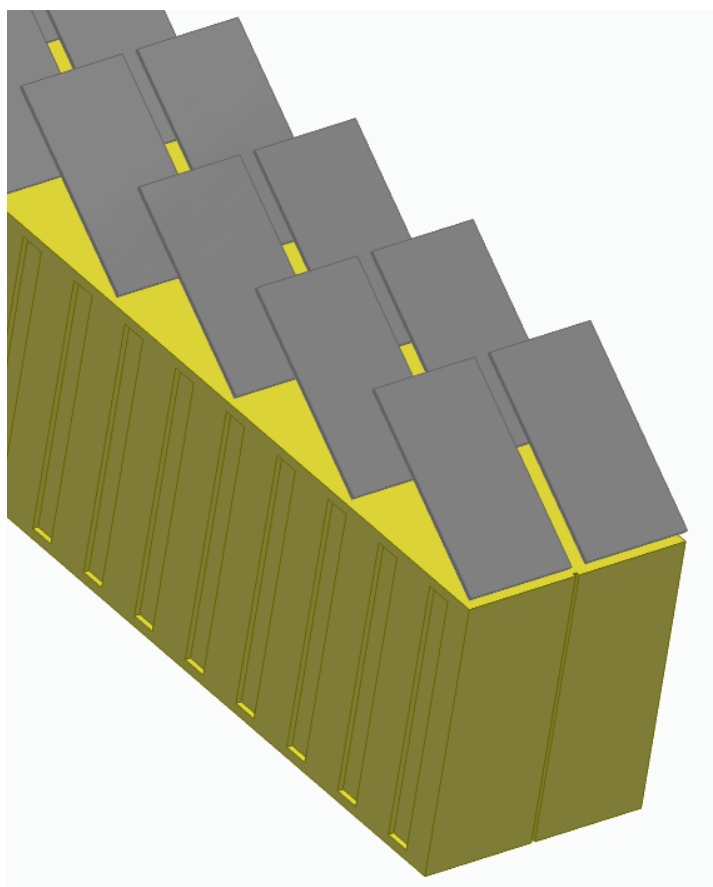
Ennek kisméretű verziója az ötös számú változat, amely a második változatnál is rosszabbul szerepelve az utolsó helyen végzett. A legfőbb probléma a nagyon lassú energiatermelés, és az ebből adódó hatalmas, a rendszer villamos teljesítményére vonatkoztatott fajlagos beruházási költség és a rendkívül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

Diplomamunkám célja egy olyan energiatermelő és energiátároló 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 szakirodalomfeldolgozás 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.

6. Summary

The goal of my thesis was to investigate the possibility of an energy-producing and energy-storing device that produces hydrogen using solar cells. After storage, this can be used alone or mixed with biogas to produce electricity in a mobile, containerized design. This allows us to store solar energy and use it in the form of electricity at any time. After the literature review, I examined five options. After presenting the different versions, I performed their energetic analysis and also dealt with the design options. This was followed by a detailed economic calculation. Based on the calculations, I presented the finalized versions and then compared them. The large, gas mixture using version proved to be the best. It had the lowest specific cost for electrical power, and the second lowest for storable energy. Taking into account the return time of the investment too, which was the shortest of them all, it proved to be the only version economically feasible at present. Its only notable drawback is that it can only be used where there is sufficient amount of biogas provided from an external source. The small version of this did not perform much worse, moreover, its specific cost for storable electricity was the lowest, however, the more advantageous features of the larger version overshadowed it. Biogas production and biogas storage in the container has no economic reasonability and the same goes for the small, hydrogen fuel cell using version. The large version of the latter did not prove to be economical either, but due to the expected decrease in the costs of the technology, it may have a right to exist in the near future. Another important advantage is that it requires only water to operate, which allows it to be used almost anywhere.

NYILATKOZAT

a diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve:	Rátkai Márton
A Hallgató Neptun kódja:	UI1GWP
A dolgozat címe:	Megújuló energia előállítására és időszakos tárolására alkalmas mobil platform tervezése
A megjelenés éve:	2023.
A konzulens intézetének neve:	Műszaki Intézet
A konzulens tanszékének a neve:	Gépszerkezettani Tanszék

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

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

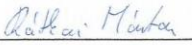
A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

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

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

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitori rendszerében.

Kelt: 2023. 10. 18.


Hallgató aláírása

NYILATKOZAT

Rátkai Márton (hallgató Neptun azonosítója: UI1GWP) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekinttem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A diplomadolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom / nem javaslom.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem

Kelt: 2023. 10. 18.



belső konzulens

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, Bhavnesh; 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, Anyagvizsgálók 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
- [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*
- [14] Elektrobagoly (2023): Félcellás 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_aramfejleszto_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] Térmester (2023): 20 lábás konténerek, <https://termester.hu/kontenerek/20-labas-uj-egyutas-raktarkontener/> (utolsó elérés 2023. 07.13.), (b)
- [48] Térmester (2023): 40 lábás 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.)