



SZAKDOLGOZAT

ÓE-KVK

Hallgató neve: Varga Beatrix

2021.

Hallgató törzskönyvi száma: T006024/F112904/K

Modul csoport: Energetikai informatika



SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Varga Beatrix

Szaktervezési száma: SZD21090213454101

Törzskönyvi száma: T006024/FI12904/K

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: villamosmérnöki (magyar nyelven) (Budapest)

Specializáció: Energetikai informatika modul

Villamosenergetika specializáció

Számítógépes folyamatautomatizálás modul

Infokommunikációs technológiák specializáció

Műszer-automatika specializáció

A dolgozat címe: A megújuló energiaforrásokkal megtermelt villamos energia, hidrogénenergetikai felhasználása.

A dolgozat címe angolul:

A feladat részletezése: 1. Röviden mutassa be a hidrogén szempontjából releváns megújuló energiaforrásokat!

2. Röviden ismertesse az Európai Unió hidrogénenergetikai törekvéseit és térjen ki a Power to Gas technológia bemutatására!

3. Csoportosítsa a tüzelőanyagcellákat, elemezze azok energetikai felhasználási lehetőségeit!

4. Koncepcióterv szinten, tervezzen meg egy képzeletbeli Power to Gas technológián alapuló üzemet!

Intézményi konzulens neve: Szén István

A kiadott téma elévülési határideje: -

Beadási határidő: 2021. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2021. 12. 13.

P.H

.....
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

.....
belső konzulens

.....
külső konzulens



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2021. *december* 13.

Varga Beatrix
hallgató aláírása

A megújuló energiaforrásokkal megtermelt villamos energia, hidrogénenergetikai felhasználása

Varga Beatrix

témavezető:

Szén István

villamosmérnök, mérnöktanár

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

2021. december 13.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Szén Istvánnak, hogy segítségével hozzájárult dolgozatom elkészítéséhez.

Tartalomjegyzék

Ábrák jegyzéke	iv
1. Bevezetés	1
2. Nap	2
2.1. Napenergia	2
2.2. Aktív napenergia hasznosítás	3
2.3. Napenergia termelési mutatók	8
3. Szél	10
3.1. Szélenergia	10
3.2. Szélerőmű	11
3.3. Szélenergia termelési mutatók	15
4. Villamos energia termelés és felhasználás	17
4.1. A villamos energia import-export alakulása	17
4.2. Megújuló energiaforrásból termelt villamos energia	19
4.3. A villamosenergia-rendszer stabilitása	23
5. Megújuló energiasztratégiák	26
5.1. Az Európai Unió energiasztratégiája	26
5.2. Magyarország energiasztratégiája	26
6. Hidrogén	28
6.1. Hidrogénenergetika	28
6.2. Európai hidrogénenergetikai megoldások	28

7. Energiaátalakítás	32
7.1. Power-to-Gas technológia	32
7.2. Alkalmazott eljárások	35
8. Tüzelőanyag-cellák	39
8.1. Tüzelőanyag-cellák alapok és működési elvek	39
8.2. A tüzelőanyag-cella veszteségei	40
8.2.1. A tüzelőanyag-cella hatásfoka	42
8.3. Tüzelőanyag-cellák típusai és jellemzői	43
8.4. PEM tüzelőanyag-cella alkalmazása	52
9. Hidrogén energia	55
9.1. Hidrogén energia felhasználásának lehetőségei	55
9.2. Hidrogén energiapark	55
9.3. Hidrogén tárolása	61
9.4. Hidrogén szállítása	62
9.5. Hidrogén felhasználása a vas-acélgyártásban	64
9.6. Hidrogén keverése földgázzal	66
9.7. Hidrogénpark Magyarországon	68
10.Összegzés	71
11.Summary	72
Hivatkozások	73

Ábrák jegyzéke

2.1. A naponta érkező energiamennyiség [1]	2
2.2. A globális sugárzás átlagos évi összege Magyarországon [1]	3
2.3. Napkollektor részei [3]	4
2.4. A napkollektorok havi sugárzásnyeresége a dőlésszög függvényében [1] . . .	5
2.5. Napelem [4]	5
2.6. A napelemek gyártásában használatos anyagok [1]	6
2.7. Bruttó villamosenergia-termelés éves adatai [GWh] [7]	8
2.8. Napenergia termelési mutató	8
3.1. Szélturbina [8]	11
3.2. A szélerőmű fő alkotórészei [10]	12
3.3. A telepítésekre jellemző példák [10]	15
3.4. Szélenergia termelési mutató	15
3.5. Nap- és szélenergia termelési mutatók	16
4.1. Magyarország bruttó villamosenergia-felhasználása [12]	17
4.2. Az import aránya a magyar bruttó villamosenergia-ellátásban [12]	18
4.3. Magyarország bruttó villamosenergia-felhasználása 2019-ben és 2020-ban [12]	18
4.4. Primer termelés, 2019. január - 2021. január (PJ) [13]	19
4.5. Megújuló energiaforrásból termelt villamos energia, 2021. január [13]	20
4.6. Primerenergia-termelés, 2019. január - 2021. július (PJ) [14]	20
4.7. Megújuló energiaforrásból termelt villamos energia, 2021. július [14]	21
4.8. Primerenergia-termelés, 2019. január - 2021. szeptember (PJ) [15]	22
4.9. Megújuló energiaforrásból termelt villamos energia, 2021. szeptember [15] .	22

4.10. Napenergia termelés aránya [16]	23
6.1. Vízgőzt pőfőgő üzemanyagcellás kukásautó [23]	31
7.1. Teljes energiaátalakítási hatékonyság alkalmazott konverziók és tüzelőanya- gok szerint [25]	33
7.2. P2G szén-dioxid egyenlege [25]	34
7.3. 2019-es német árak [25]	34
7.4. P2G és P2M folyamatok általános működése [26]	35
8.1. Áramsűrűség-feszültség diagramm [29]	42
8.2. A tüzelőanyag-cella típusai és felhasználási lehetőségeik [30]	43
8.3. Alkáli Elektrolitos Cellák [32]	45
8.4. Protoncsere Membrános Cella [32]	47
8.5. Olvadt Karbonátos Cella [32]	50
8.6. Szilárd Oxidos Cella [32]	52
8.7. A REBOX „szekrényének” gáz-és villamos-oldaliberendezései [33]	54
9.1. Hidrogéntermelés folyamata, hidrogéntárolás és hidrogénszállítás [38]	59
9.2. 800 Nm ³ /h lúgos elektrolizátor, amelyet a Kínai Állami Hajóépítő Társaság 718. Kutatóintézete (CSSC) fejlesztett ki. [41]	60
9.3. A nagyüzemi hidrogéntermelő rendszerek hidrogénszállítási módjai. [41] . .	62
9.4. Teljesítmény átcsoportosítás a PV-hidrogén rendszerben. [41]	63
9.5. Magyarországi energiapark (projekt)	68

1. fejezet

Bevezetés

A szakdolgozatomban a megújuló energiaforrásokkal megtermelt villamos energia, hidrogénenergetikai felhasználásával fogok foglalkozni. A nap-, szélenergia jellemzőit fogom vizsgálni villamos energia termelés szempontjából. Kitekintek az Európai hidrogénenergetikai megoldásokra. Részletesen bemutatom a Power-to-Gas technológiát és típusait. Elmélyülök a tüzelőanyag-cellák típusaiban, alkalmazásaikban. Elemezni fogom a hidrogéntermelési, hidrogéntárolási és hidrogénszállítási módokat.

A dolgozatomban végére egy olyan villamos energia termelési technológiai megoldást szeretnék kapni, ami számottevően csökkenti a károsanyag kibocsátást és nem csak környezetvédelmi szempontból, de gazdaságilag is megoldást jelenthet a jövőre nézve. A elemzett adatokból egy hidrogén energiapark felépítésére, működésére szeretnék javaslatot tenni.

2. fejezet

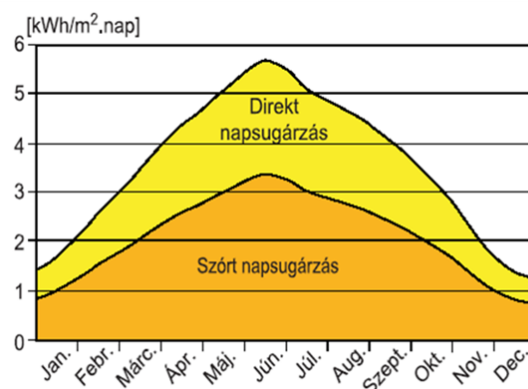
Nap

2.1. Napenergia

A Nap energiája a Földet sugározással éri el, hő és fény formájában. Az atmoszféra felső rétegeibe $1,74 \times 10^{17} W$ energia érkezik a Földre a Napból. Az érkező energia 30% visszatükröződik az űrbe, a maradékot az óceánok, felhők és a földfelszín nyelik el.

A napsugárzás különböző hullámhosszakon és különböző intenzitással történik. Elektromágneses sugárzás egy adott tartományát fénynek nevezzük, ezt a tartományt emberi szemmel is látható.

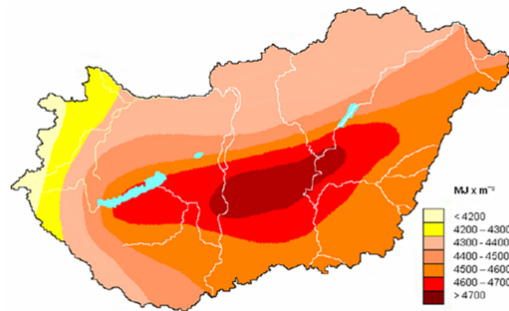
A napsugárzással naponta több kWh energia érkezik egy négyzetméterre, még akkor is, ha kissé felhős az ég. A napsugárzással működő eszközök, mint például a napkollektorok, napelemek szórt fényben is működnek.



2.1. ábra. A naponta érkező energiamennyiség [1]

„A Napból Magyarország felszínére jutó globális sugárzás évi összege az ország terü-

letének túlnyomó részén $4200\text{--}4600 \text{ MJ}/\text{m}^2$ értékű. A legtöbb besugárzás a Duna-Tisza közének középső területén, valamint az Alföld középső és keleti részein tapasztalható. A legkevesebb besugárzásban az Alpokalja és az Északi-középhegység részesül, ahol a besugárzás évi összege alig éri el a $4100 \text{ MJ}/\text{m}^2$ -t. Ennek oka, a földrajzi szélesség változása, amely a mérsékelt öv középső területein befolyásolja legérzékenyebben a besugárzás évi mennyiségét. Az ország területének 3° -os észak-déli kiterjedése $200 - 250 \text{ MJ}/\text{m}^2$ sugárzáskülönbséget jelent.” [1]



2.2. ábra. A globális sugárzás átlagos évi összege Magyarországon [1]

Napenergia hasznosítása :

Passzív: épületek tájolása, építőanyagok megválasztása.

Aktív: naperőművek, napkollektorok, napelemek.

2.2. Aktív napenergia hasznosítás

„A naperőmű egy gyűjtőfogalom, mely a napenergiát felhasználó erőműfajtákat foglalja magába. A naperőműveknek több típusát különböztetjük meg, de mindegyik azonos elven működik. A Napból származó sugárzás energiáját alakítják át felhasználható energiává, például elektromos árammá vagy hővé. 2003-ban több mint 700 megawattóra energiát állítottak elő világszerte napenergiából. A napenergia egy végtelen energiaforrás, amit jelenleg csak korlátozott mennyiségben tudunk kihasználni.” [2]

A naperőmű előnyei:

Az egyik legfontosabb előnye, hogy a napenergia valóban megújuló energiaforrás, ha a napenergiát hasznosító rendszer telepítve van, utána ma az energia "ingyen" van. Szinte bárhová lehet telepíteni, ahol elegendő napsütés áll rendelkezésre. Működése nem jár

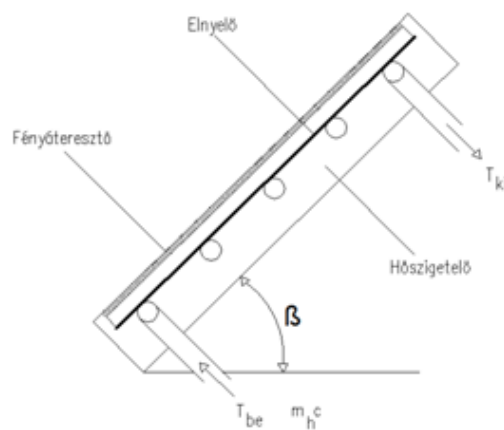
melléktermék kibocsájtással, így nem szennyezi a környezetet. A napelemes rendszereknek alacsony a karbantartási költsége. A napenergia nem vonható embargó alá, csökkenti a más országoktól való függést.

A naperőmű hátrányai:

Magas a telepítési költségük. Teljesítményük időjárásfüggő. Felhős vagy esős időben is termelhetnek, de sokkal kevesebbet. Az előállított energiát nehéz tárolni. Napelemek telepítéséhez hely kell.

Fajtái:

1. Napkollektor: „A napkollektor a napsugárzást közvetlenül hőenergiává alakítja át. A Nap segítségével előállított hőenergiát különböző közegek felmelegítésére, mint például vízmelegítésre lehet használni, melyet fűtési célokra lehet felhasználni.” [2]

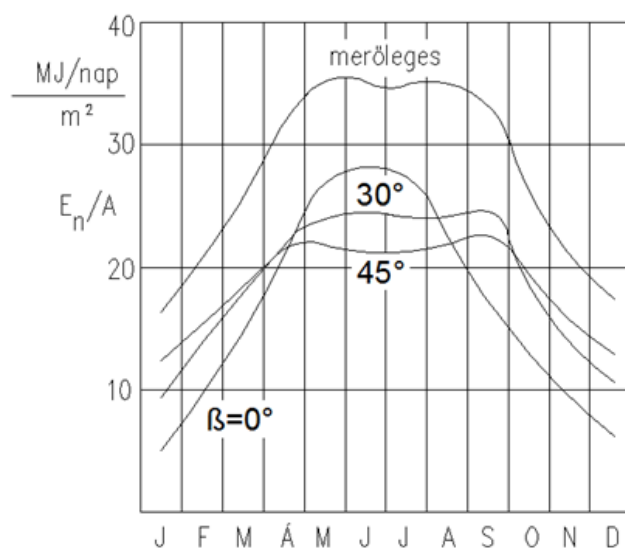


2.3. ábra. Napkollektor részei [3]

A napkollektor szögállása befolyásolja az energia hasznosítását. Az optimális eset, ha a kollektor felülete merőleges a napsugárzásra. Nyáron a vízszintes elrendezés a legkedvezőbb, viszont ez télen a legkedvezőtlenebb.

2. Napelem és fotovillamos naperőmű: „A napelem a Napból érkező sugárzást közvetlenül áramfejlesztésre hasznosítja. Az energiaátalakítás alapja, hogy a sugárzás elnyelődésekor mozgóképes töltött részecskéket generál, melyek irányított mozgása egyenáramot állít elő. A napelemeket kisebb méretben szokás hasznosítani. A sok egymás mellé telepített napelemeket fotovillamos erőműnek nevezzük.” [2]

Fajlagos területigénye: $102 \text{ m}^2/\text{kW}$



2.4. ábra. A napkollektorok havi sugárzásnyeresége a dőlésszög függvényében [1]

Elérhető villamos teljesítmény: sok mW

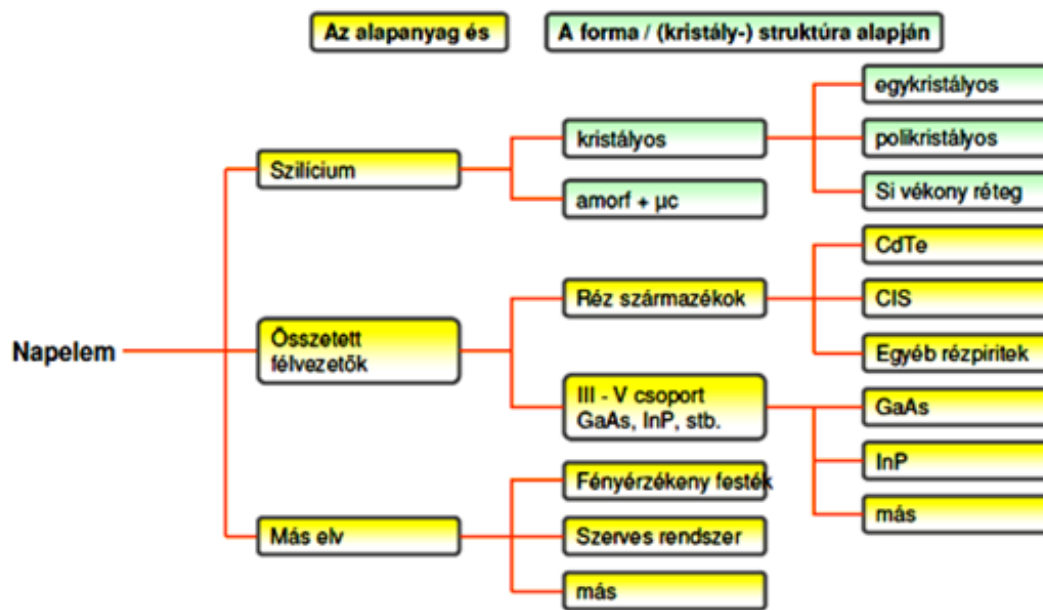
Hatásfoka: 20-60%



2.5. ábra. Napelem [4]

A legtöbb napelem kristályos szilíciumból készül, így a felépítésük eléggé hasonló a szilícium alapú eszközökhöz, mint az egyenirányító diódák.

Abban az esetben, ha a napelem rendszerünk nem haladja meg az 5 kW-os teljesítményt, akkor az áramszolgáltató az áramot ugyanazon az áron veszi vissza, mint amennyiért ő adja nekünk. Napközben amikor általában nem vagyunk otthon, a



2.6. ábra. A napelemek gyártásában használatos anyagok [1]

rendszer betáplál a hálózatba. Este pedig mikor már otthon vagyunk a napközben megtermelt energiát fogyasztjuk el. Elszámoláskor azt az energiakülönbséget kell kifizetnünk, amennyivel többet használtunk, mint megtermeltünk.

Olyan felhasználás is lehetséges, ahol a rendszer nem táplál vissza a hálózatba, hanem a megtermelt energiát egy arra alkalmas energiatárolóban tároljuk. Ilyen tárolók például a speciális akkumulátorok, mert a napelemes rendszerben sok a feltöltés-kisütés.

3. Naphőerőmű: „A naphőerőmű egy közvetítő közeg közbeiktatásával állít elő hő-, majd villamos energiát. A Nap sugárzását egy hőhordozó közegre (speciális olajok, olvasztott só, stb) fókuszálják (pl. tükrök, úgynevezett heliostatok, segítségével), és az abból keletkezett hőenergiát használják fel áramtermelésre. A működési elv a továbbiakban nem különbözik a közönséges hőerőművektől vagy atomerőművektől. A meleg közeg hőenergiája révén gőzt fejlesztenek, mely turbinákra vezetve mozgási energiává alakul, majd a mozgási energia meghajtja a generátorokat, amivel elektromos áramot lehet előállítani. A naphőerőművek a felmelegített közeg tárolása révén folyamatos villamosenergia-előállításra is képesek.” [5]

Egy 0,5 MW-os naperőmű körülbelül 250 háztartás éves villamosenergia-felhasználását fedezi.

A legnagyobb magyar fotovoltaikus naperőművek[2]:

- Mátrai Naperőmű (Visonta) 16 MW (2015)
- Pécsi naperőmű 10 MW (2016)
- Szombathelyi naperőmű 0,385 MW (2016)

Jelentősebb magyar naperőművek [2]:

- Kaposvári napelempark 100 MW (2021)
- Paksi naperőmű 20,6 MW (2019)
- Mátrai naperőmű (Bükkábrány) 20 MW (2019)
- Felsőzsolcai naperőmű 20 MW (2018)
- Százhalombattai naperőmű 17,6 MW (2018)

„Az általánosságban elmondható, hogy ha a körülmények megfelelőek, akár évi 1100-1250 kWh-t (kilowatt órát) is termelhetünk egy 1 kWp (1 kilowattpeak csúcsteljesítményű) optimálisan tájolt rendszerrel. Ebből tovább lehet vezetni a napelem teljesítmény számítását, miszerint ha az 1 kWp napelem éves termelése 1100-1250 kWh, akkor egy átlagos családi ház esetében számolható 4400 kWh fogyasztás kiváltásához nem árt egy 3,5-4,0 kWp-es rendszer telepítése. Ha pedig a napelem méretéről van szó (amivel a tervezésnél szintén nem árt előre kalkulálni), egy 1 kWp (1000 Wp maximális teljesítményű) napelem rendszer nagyjából 6-8 m² (tető)felületet fog igényelni.” [6]

Várható valós energiatermelés = Napelem rendszer elvárt energiatermelése (pontos napelem dőlésszöggel és déli iránnyal bezárt szöggel) – rendszer várható vesztesége.

„Ez a formula azonban így még nem teljes. A napelem rendszer előre vetített energiatermelésének kiszámításakor figyelembe kell venni azt is, hogy a napelem egy óra alatt leadott kWp (a kWp jelentése kiloWattpeak, vagyis csúcserő) maximális teljesítményét a napsütés intenzitásától és hőmérséklettől függően a napelem leadott áramerőssége jelentősen befolyásolni fogja. $P = U \cdot I$ A leadott Watt teljesítmény (P) az állandó feszültség (U) és az áramerősség (I) függvényében változik.

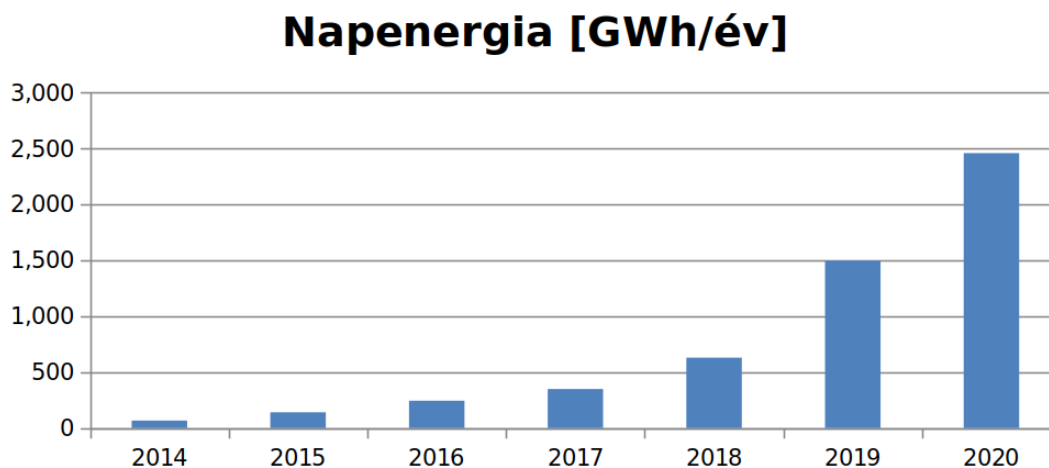
A feszültség ugyan állandó, de a napsütés intenzitása és a külső hőmérséklet folyamatosan változik: időjárástól függően, napszaktól függően, éves szinten is az évszak függvényében. Ha nem szeretnénk képletekkel számolni, akkor a különböző szimulációs programokkal is meghatározhatjuk a pontos hozamot.” [6]

2.3. Napenergia termelési mutatók

A Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal oldalán található bruttó villamosenergia-termelés éves adatai alapján készítettem egy diagramot az adatok szemléltetéséhez. A felhasznált értékek az alábbi táblázatban láthatóak.

Energiahordozó	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Nukleáris	15,649	15,834	16,054	16,098	15,733	16,288	16,055
Szén és széntermékek	6,114	5,908	5,758	5,098	4,834	4,184	3,826
Földgáz	4,240	5,108	6,479	7,869	7,282	8,700	9,091
Kőolajtermékek	76	77	63	86	91	71	45
Biomassza	1,702	1,660	1,493	1,645	1,798	1,769	1,664
Biogáz	287	293	333	348	336	321	324
Kommunális hulladék megújuló	137	208	245	159	162	137	167
Víz	301	234	259	220	222	219	244
Szél	657	693	684	758	607	729	655
Nap	67	141	244	349	629	1,497	2,459
Geotermikus	0	0	0	1	12	18	16
Egyéb	173	204	290	284	361	358	384
Osszesen	29,403	30,360	31,902	32,915	32,067	34,291	34,930

2.7. ábra. Bruttó villamosenergia-termelés éves adatai [GWh] [7]



2.8. ábra. Napenergia termelési mutató

Ahogy a 2.8. ábrán is látható a napenergia termelés igen kezdetleges volt még 2014-ben. A rá következő években sem növekedett drasztikusan a napenergiával termelt energia

mértéke. Nagyobb ugrást 2018-ról 2019-re tapasztalható. A temelés értéke több, mind a duplájára emelkedett. Az emelkedéshez a lakossági napelemek, napkollektorok telepítése is hozzájárul. 2019-ről 2020-ra szintén nagyobb ugrás látható. A folyamatos növekedés egyik oka a napelemes támogatások számának növekedése. A napenergia kezdetleges termelésénél nem voltak támogatások így a lakosságnak önerőből kellett finanszíroznia a napelem telepítési költségeit viszont 2020-tól megfigyelhető, hogy egyre több család választja a napenergiával működő megoldásokat a támogatásoknak köszönhetően is.

3. fejezet

Szél

3.1. Szélerőenergia

A szélerőenergia a világ leggyakrabban használt megújuló energiaforrása, megelőzve a vízenergiát és a napenergiát.

A szélerőenergia a levegő mozgási energiáját jelenti, amely a légkörben kialakuló nyomáskülönbségek hatására jön létre. A légkörben található melegebb légrétegek sűrűsége kisebb az őket körülvevő hűvösebb légrétegekénél. A melegebb levegő felfelé száll, a felfelé szálló levegő helyére hűvösebb levegő áramlik. A Földet elérő Nap energiájának 1-4 százaléka szélerőenergiává alakul. E szélerőenergia nagy része olyan magasságokban található meg, ahol 160 km per órát meghaladja a szél folyamatos sebessége.

A szél mozgási energiája: Az A keresztmetszeten, v sebességgel átáramló ρ sűrűségű légréteg tömegárama:

$$m = \rho Av, [\text{kg/s}]$$

A szélerőművek a szélnek csak egy részét képesek hasznosítani:

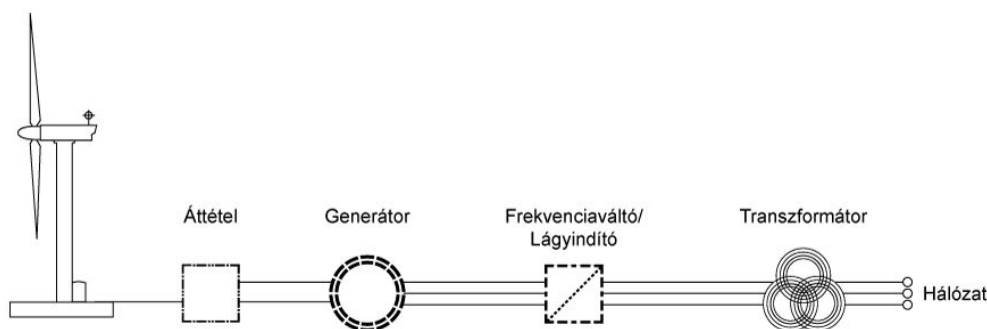
$$\frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho Av^3, W$$

ahol,

- ρ a levegő sűrűsége (kg/m^3),
- v a levegő sebessége (m/s),
- A a rotor által súrolt felület (m^2).

„A szél energiájának maximum 59,3 %-át képesek hasznosítani a szélgenerátorok, ezt Betz-maximumnak nevezzük. A szél változásai miatt további veszteségek lépnek fel a gyakorlatban, így 20-30 % az amit valójában feltudunk használni. A turbinák teljesítménye alapvetően a szélesebségtől függ, így a telepítési helyek kiválasztása gazdaságosság szempontjából jelentős szerepet játszik.” [40]

3.2. Szélerőmű



3.1. ábra. Szélturbina [8]

„A szélerőművek egy vagy több szélturbinából állnak. A szélturbinák lapátjai a repülőgép szárnyaihoz hasonlóan működnek. A repülőgép szárnyai felett és alatt előrehaladás közben légnyomáskülönbség alakul ki, így felhajtóerő képződik. A szélturbinákat a szeles időben a lapátok hátoldalán kialakuló alacsonyabb légnyomás, illetve a légnyomáskülönbség következtében képződő húzóerő hajtja. A lapátokat egy generátorral kapcsolják össze, amely forgás közben áramot termel.” [9]

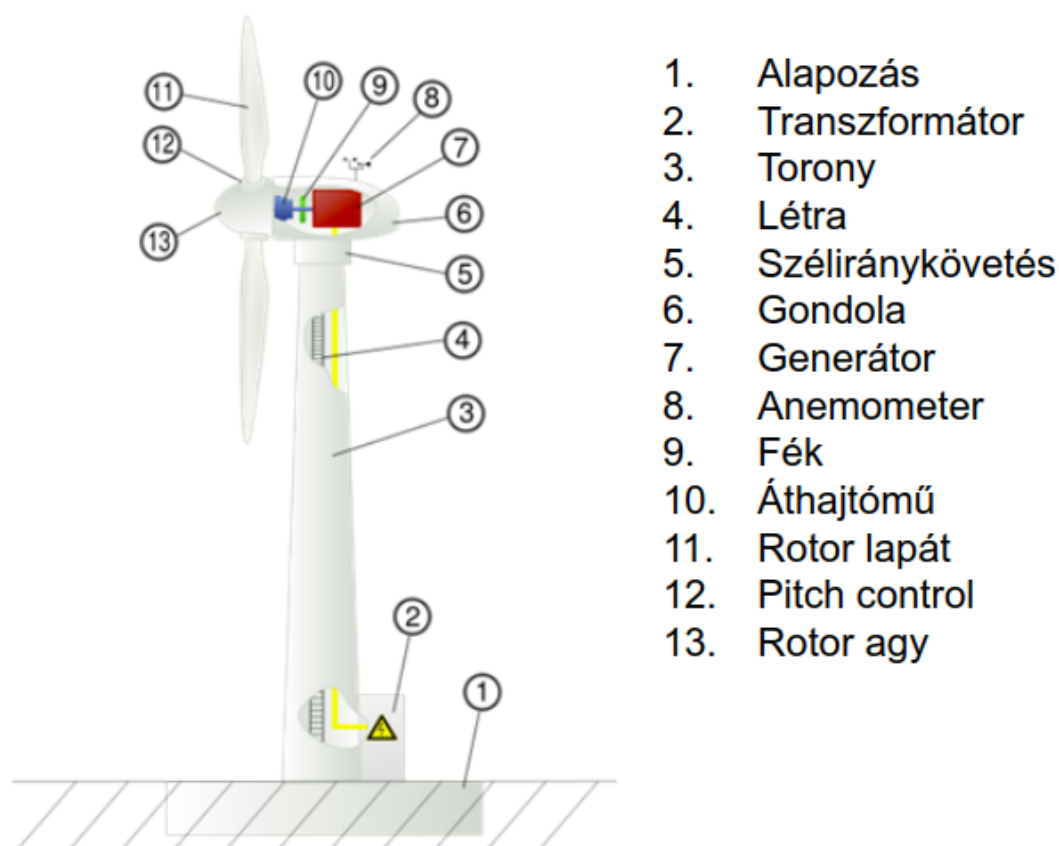
Szélerőművek élettartama átlagosan 25 év. Az alkatrészeik elhasználódásuk után nagyrészt újrahasznosíthatóak. Üzemeltetési költségük igen alacsony. Nem növelik az üvegházhatást, mert nem bocsátanak ki szén-dioxidot és más káros anyagot. A szél megújuló energiaforrás, sosem fogyunk ki belőle. A szélerőműparkok üzemeltetésük biztonságok, építésük egyszerű. Sajnos nem csak előnyük de hátrányuk is van. Nagyon erős vagy nagyon gyenge szélben leállnak a turbinák. 25km/h széllökésnél a rendszer biztonsági okokból leáll. Nem tudjuk befolyásolni mikor, hogyan fújjon a szél. Szélerőművek csak megfelelő helyen építhetőek, mert a szél fújása fontos tényező, ezért tengerpartok és dombvidékek jöhetnek elsősorban szóba. Ami még ellenük szól az az, hogy esztétikailag nem a legszebb

látványt nyújtják, ezért elcsúfíthatják a természetes táj szépségét.

Akkumulátorok segítségével felhasználható helyileg a megtermelt villamos energia vagy továbbítható az országos hálózatba, ezt a szélerőmű területén elhelyezett transzformátorok végzik, a kismegnyomású áramot közepesmegnyomású árammá alakítják, ezzel alkalmassá válnak a hálózathoz való csatlakozáshoz.

Egy szélfarm mérete attól függ hány szélturbina áll a területén. Gazdasági szempontból kedvezőbb ha minél több turbina áll egy területen, így a transzformátorok kapacitását maximálisan ki lehet használni.

Szélturbina felépítése



3.2. ábra. A szélerőmű fő alkotórészei [10]

Tengeri tornyok: 3-5 MW teljesítményűek

Szárazföldi tornyok: 2-4 MW teljesítményűek

Egy háztartás egy évben 2400-4000kWh villamosenergiát használ fel, ezt a villamosener-

giát egy 3 MW teljesítményű turbina körülbelül egy óra alatt megtermeli. Magyarországon található turbinák közül a legtöbb 2 MW teljesítményű, ez a típus évente 1200 háztartás energiáját biztosítja.

Szélmotorok, generátorok:

- Lapátkerék kialakítás szerint lehet: sík, ívelt, kanalas.
- Lapátkerék anyaga szerint lehet: fa, fém, műanyag.
- Lapátkerék működés szerint lehet: merev, önbeálló, vezérelt.
- Tengely elhelyezés lehet: vízszintes, függőleges.

Munkavégzés szerint:

1. elektromos energia,
2. vízszivattyúzás,
3. mechanikai tárolók meghajtása.

Viharvédelem szerint:

1. kis egységek
 - rúgóerő
 - tömegáthelyezés
2. nagy egységek
 - mechanikus
 - hidraulikus
 - villamos külső vezérlés

Állványzat szerint:

1. kialakítás
 - cső

2. rácsszerkezet

- anyaga
 - (a) fa
 - (b) fém
 - (c) vasbeton

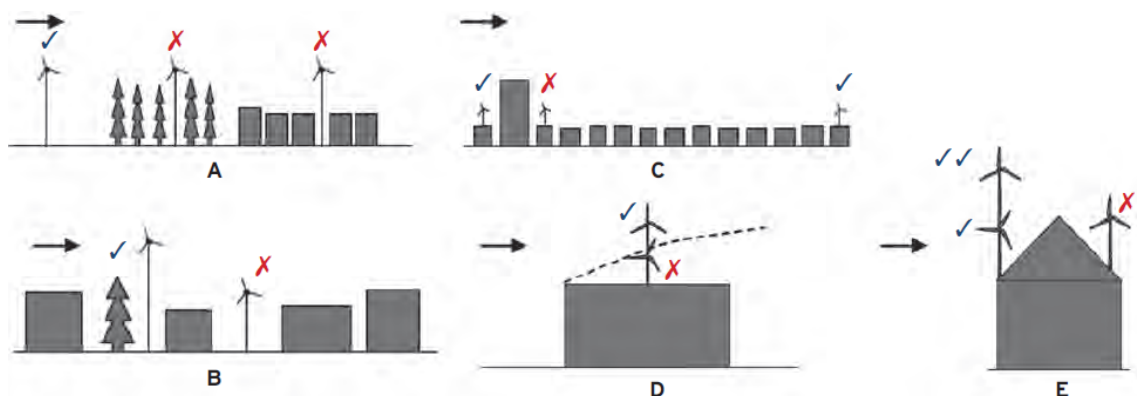
A legnagyobb összteljesítményű szélérőművek Magyarországon [11]:

(A felsorolt szélérőműveket 2000 és 2010 között helyezték üzembe)

- Kisigmánd — 50 MW
- Ikervár — 34 MW
- Bőny — 25 MW
- Levél — 24 MW
- Bábolna — 15 MW
- Nagyigmánd — 14 MW
- Sopronkövesd — 12 MW
- Csém — 12 MW
- Ács — 12 MW
- Nagylózs — 11 MW

A magyar szélérőművek 2012-ben több mint 733 ezer MWh áramot termeltek, ezzel az ország áramfogyasztásának 1,73 százalékát adták. Magyarországon 2012 végére 329 megawatt (MW) beépített teljesítményű szélérőmű kapcsolódott a közcélú villamos hálózatra. [9]

Hibás telepítés például amikor szélárnyékba helyezzük a szélgenerátort. Családi ház esetén mindig legyen magasabb, mint a közeli épületek gerincmagassága olyan 60-90%-kal.

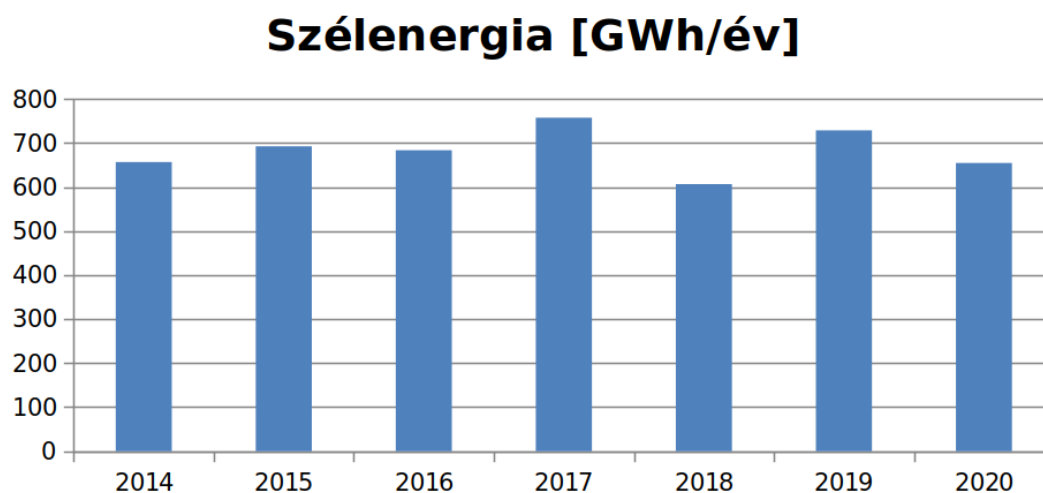


3.3. ábra. A telepítésekre jellemző példák [10]

3.3. Szélergia termelési mutatók

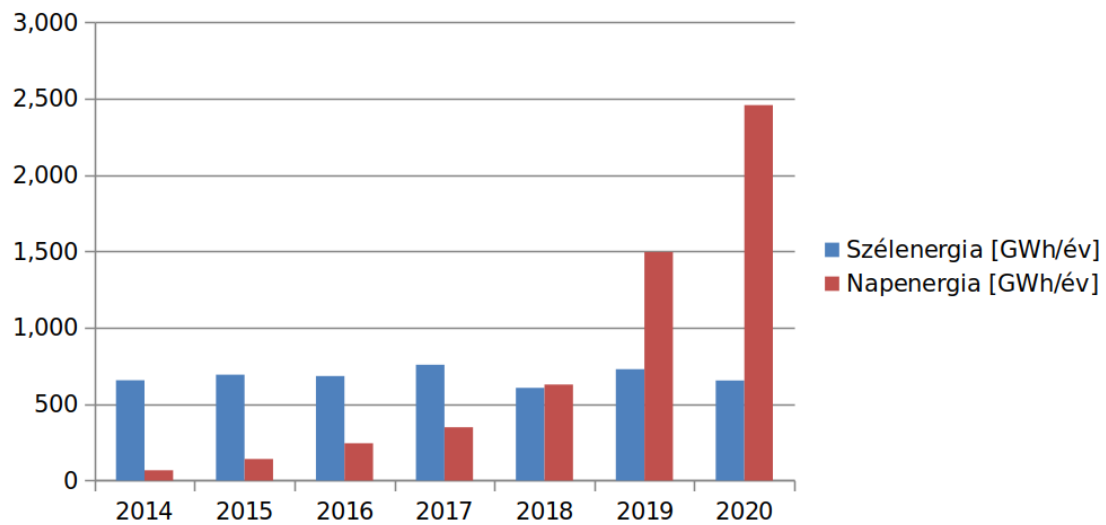
A szélergia termelési értékek viszonylag évről évre megegyeznek. A megfigyelhető kisebb eltérések mind az időjárásnak tudhatók be. Abban az évben amikor a termelési érték több, mint az átlagosan várható érték, az időjárás szelesebb volt. Viszont abban az évben amikor a várható érték alacsonyabb, abban az évben szélcsendesebb volt.

A 3.4 diagram alapján elmondható, hogy a szélergiával való termelés megbízható, mert van egy biztos minimum termelési értéke amivel előre lehet számolni.



3.4. ábra. Szélergia termelési mutató

A 3.5 diagramból jól látszik, hogy 2014-től egészen 2017-ig a szélergia termelés sokkal jobban meghatározó volt, mint a napenergia. 2018-ban a napenergia elérte a szélergia



3.5. ábra. Nap- és szélergia termelési mutatók

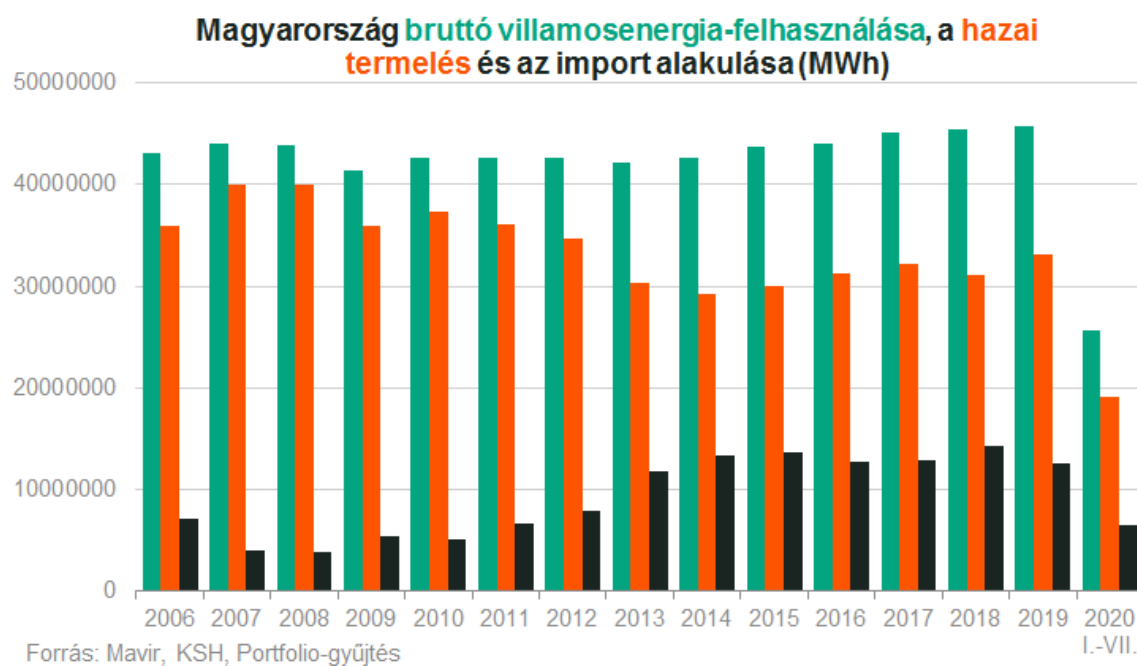
sintjét. 2019-től a termelést határozottan a napenergia vezeti a szélergiával szemben. A napenergia vezető szerepéhez a lakosság nagyban hozzájárult. A pályázatoknak is köszönhető, hogy a lakosság körében a napenergiával működő rendszerek sokkal népszerűbbek és gyakoribbak, mint a szélergiával működők.

A diagramból leolvasható tendencia alapján megállapítható, hogy a napenergia továbbra is rohamosan növekedni fog, míg a szélergiával való termelés stagnálni fog egy megbízható átlagos termelési szinten.

4. fejezet

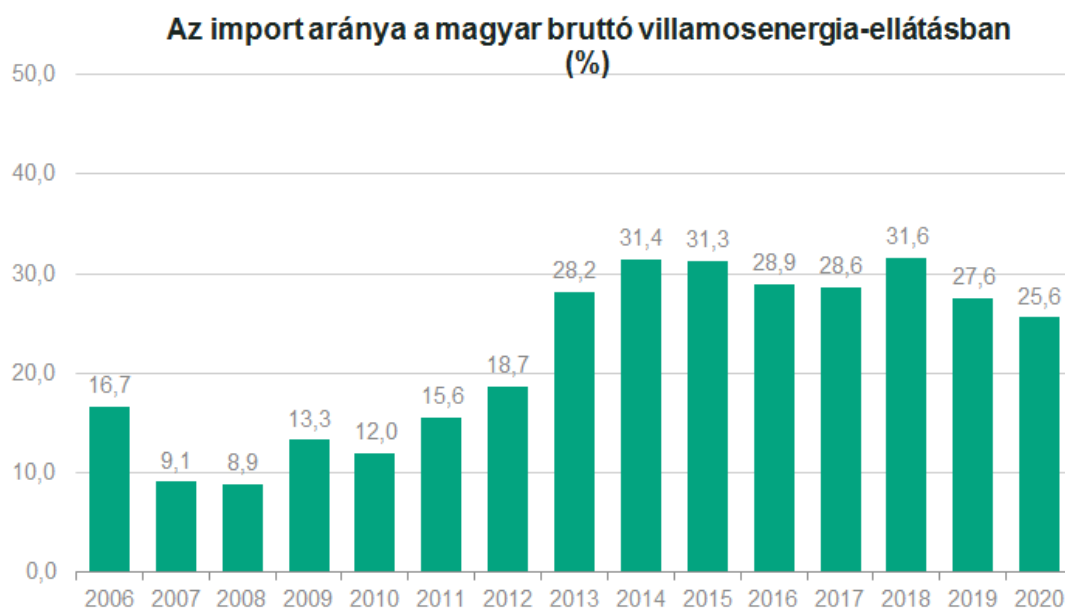
Villamos energia termelés és felhasználás

4.1. A villamos energia import-export alakulása



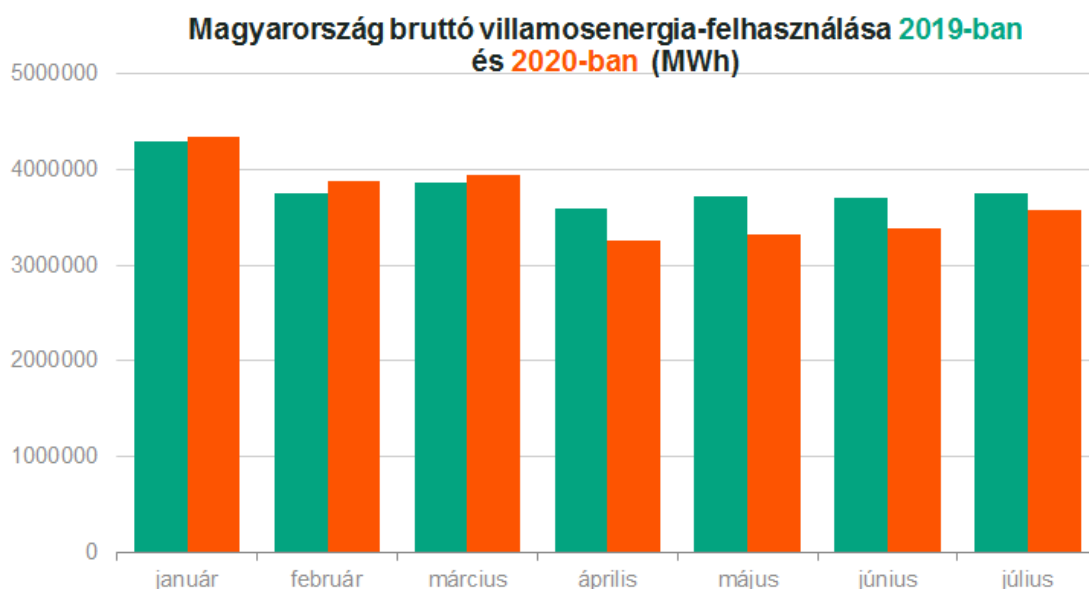
4.1. ábra. Magyarország bruttó villamosenergia-felhasználása [12]

A diagramból leolvasható, hogy az import megugrása a fogyasztás enyhe csökkenése és a hazai termelés zuhanása mellett következett be. Összefüggésbe lehet hozni a világgazdasági válsággal, a kereslet pangásával, illetve a szektor kilátásainak romlásával. [12]



4.2. ábra. Az import aránya a magyar bruttó villamosenergia-ellátásban [12]

2012-től a hazai termelési mennyiség csökkenése miatt az import mennyisége megnőtt. A felhasználási mennyiség és a termelési mennyiség közötti különbségét importtal kompenzálják. 2015-2019 között a felhasználás mérsékelten növekedett. 2020-ban viszont a felhasználás drasztikusan csökkent amit a hazai termelés követni tudott, így az import mennyiség 25,6 százalék volt.



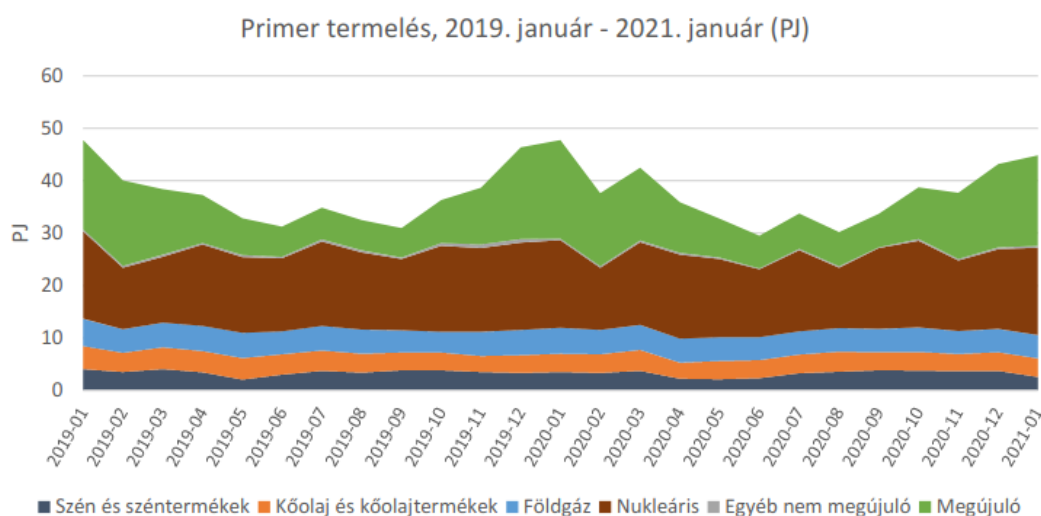
4.3. ábra. Magyarország bruttó villamosenergia-felhasználása 2019-ben és 2020-ban [12]

A koronavírus-járvány és a megfékezésére bevezetett korlátozások a villamosenergia-

felhasználás visszaeséséhez vezettek világszerte. Így történt Magyarországon is: míg az első negyedben a fogyasztás még több mint 2 százalékkal magasabb volt, mint 2019 első három hónapjában, addig 2020 második negyedében már közel 10 százalékkal kevesebb villamos energiát használt fel az ország, mint 2019-ben a hasonló időszakban. Júliusban a fogyasztás már csak kevesebb, mint 5 százalékkal maradt el az egy évvel korábbtól. [12]

4.2. Megújuló energiaforrásból termelt villamos energia

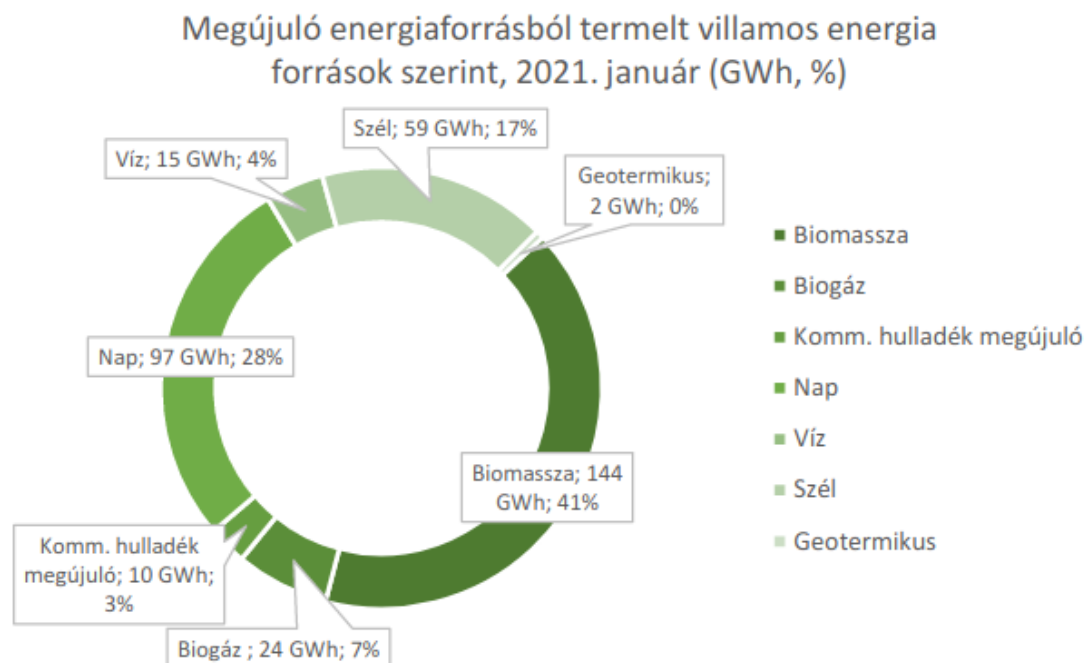
Megújuló energiaforrásból termelt villamos energia mennyisége időszakosan változik. A legnagyobb befolyásoló tényező az időjárás. A termelésben megfigyelhető, hogy például a napenergiánál a napos hónapokban (június, július, augusztus) nagyobb a termelés, mint a kevésbé napos hónapokban (október, november, december). A szélenergia termelése nagyobb tavasszal és ősszel, mint a téli hónapokban. 3 hónapot hasonlítottam össze a termelés szempontjából.



4.4. ábra. Primer termelés, 2019. január - 2021. január (PJ) [13]

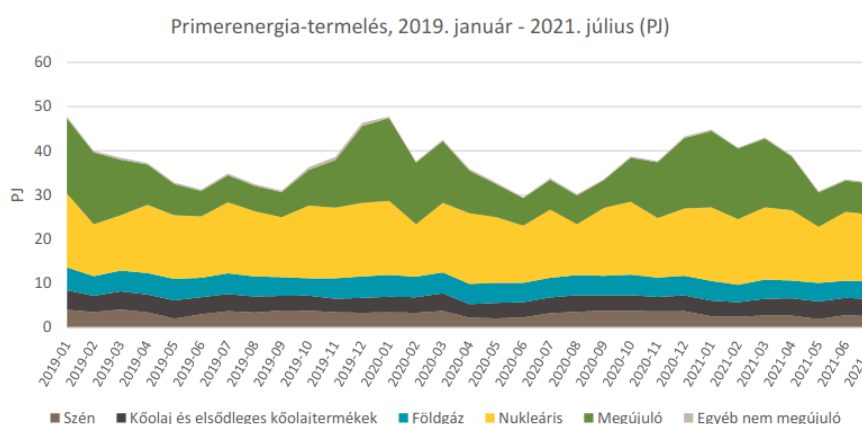
"Az országos primer energia termelés 2021. januárban 44,85 PJ volt, ami 2,91 PJ-lal alacsonyabb az előző év azonos időszakához képest. Az elsődleges fosszilis energiahordozók termelése 1,37 PJ-lal csökkent az előző év január hónapjához képest. A szén és széntermékek termelése 0,95 PJ-lal, a földgáz termelése 0,46 PJ-lal csökkent, míg a kőolaj és kőolajtermékek termelése 0,04 PJ-lal emelkedett. Az elsődleges megújuló energiahordozók

termelése 1,52 PJ-lal csökkent 2020. januárhoz képest. A nukleáris energiatermelés kis mértékben, 0,07 PJ-lal csökkent az előző év azonos időszakához képest." [13]



4.5. ábra. Megújuló energiaforrásból termelt villamos energia, 2021. január [13]

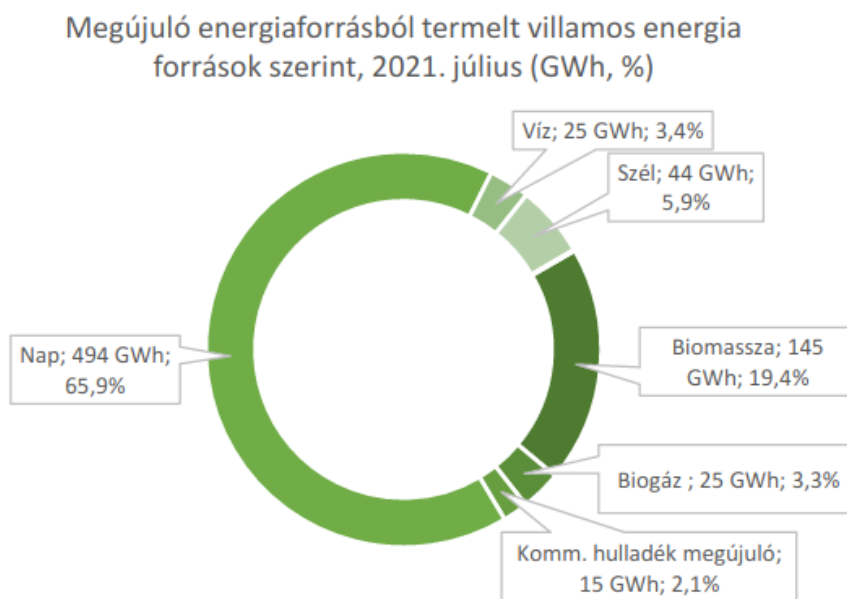
A termelés legnagyobb százalékát a biomassza teszi ki. A biomassza után a napenergia a második legtöbb energia. Ahogy a diagram is mutatja elhanyagolható mennyiségben van a jelen a geotermikus és a kommunális hulladék megújuló energiája.



4.6. ábra. Primerenergia-termelés, 2019. január - 2021. július (PJ) [14]

"Az országos primerenergia-termelés 2021. júliusban 32,79 PJ volt, amely 0,96 PJ-lal

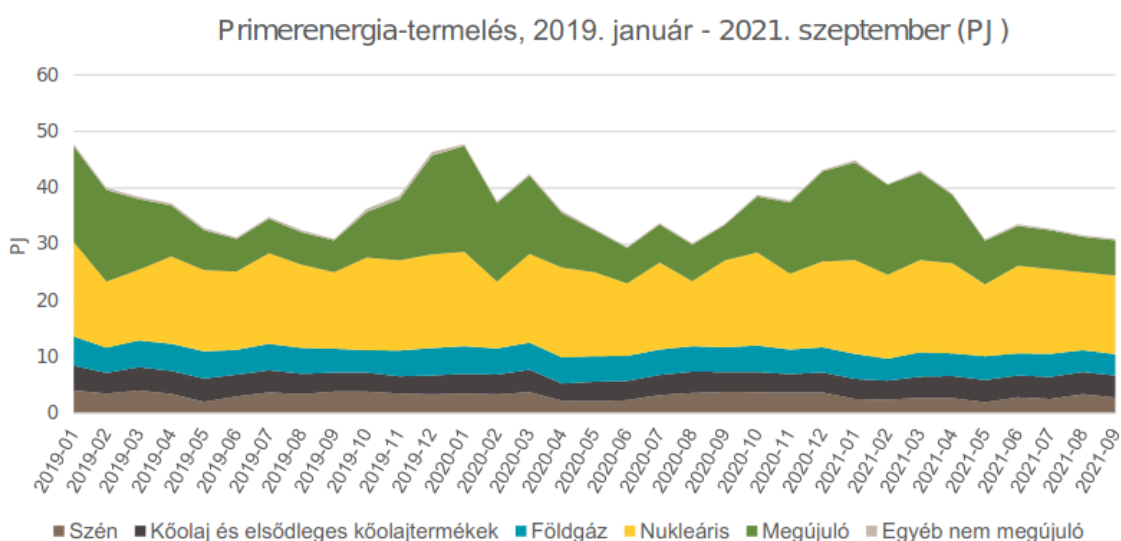
alacsonyabb az előző év azonos időszakához képest. Az elsődleges fosszilis energiahordozók termelése 0,75 PJ-lal, a nukleáris forrásból származó 0,44 PJ-lal, az egyéb nem megújuló forrásokból származó energiatermelés 0,04 PJ-lal csökkent, míg az elsődleges megújuló energiahordozók termelése 0,27 PJ-lal nőtt az előző év azonos időszakához képest. A fosszilis energiaforrásokon belül a földgáz és a szén és széntermékek termelése csökkent, míg a kőolaj és kőolajtermékek termelése emelkedett. A szénhidrogén termelés változásának hátterében az érett mezők termeléscsökkenése és az új sekélygáz kutak bekötése áll." [14]



4.7. ábra. Megújuló energiaforrásból termelt villamos energia, 2021. július [14]

A diagramból jól leolvasható, hogy a termelés legnagyobb részét több, mint a felét a napenergia teszi ki. Ez annak is köszönhető, hogy a július nagyon napos hónap, ideális a napenergia termelés szempontjából. Termelés szempontjából elhanyagolható a kommunális hulladék megújuló energiája, de a biogáz és a víz sem jelentős százalékú.

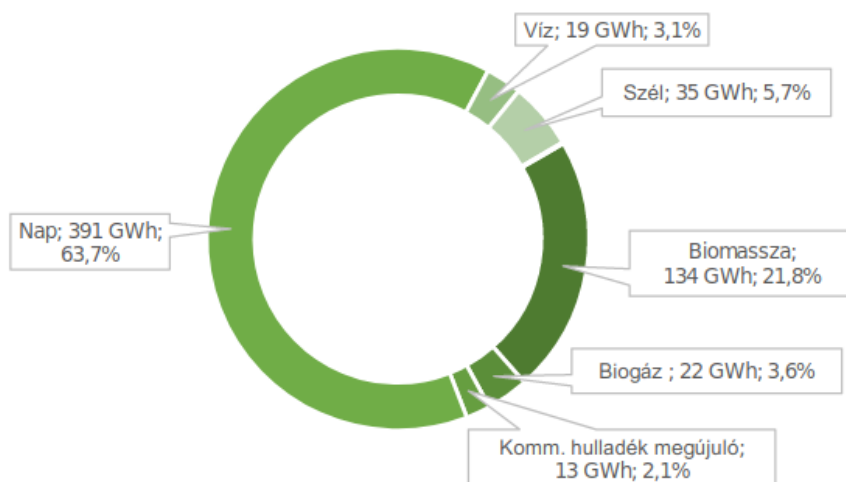
4.8. diagramból leolvasható, hogy: "Az országos primerenergia-termelés 2021. szeptemberben 30,95 PJ volt, amely 2,65 PJ-lal alacsonyabb az előző év azonos időszakához képest. Az elsődleges fosszilis energiahordozók termelése 1,25 PJ-lal, a nukleáris termelése 1,44 PJ-lal csökkent, míg az egyéb nem megújuló forrásokból származó energiatermelés 0,05 PJ-lal emelkedett az előző év azonos időszakához képest. Az elsődleges megújuló energiahordozók termelése nem változott. A fosszilis energiaforrásokon belül a földgáz és a szén termelése csökkent, míg a kőolaj és elsődleges kőolajtermékek termelése emelkedett."



4.8. ábra. Primerenergia-termelés, 2019. január - 2021. szeptember (PJ) [15]

[15]

Megújuló energiaforrásból termelt villamos energia források szerint, 2021. szeptember (GWh, %)



4.9. ábra. Megújuló energiaforrásból termelt villamos energia, 2021. szeptember [15]

A 4.9 diagramból leolvasható, hogy a termelés legnagyobb részét a napenergia szolgáltatja. A második helyen a biomassza áll 21.8 százalékkal. Elhanyagolhatóság szempontjából a kommunális hulladék megújuló energia termelése és a víz áll a legrosszabb helyen.

Összehasonlítva a 3 hónapot (január, július, szeptember) a következő következtetéseket

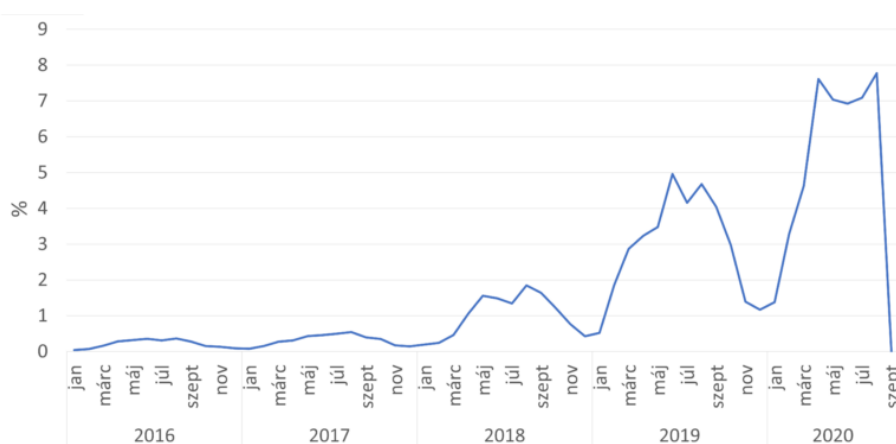
lehet levonni.

Megfigyelhető, hogy a napenergia által termelt energia a hónapok előre haladtával drasztikusan nő. Ennek az oka, hogy a nyári hónapok közeledtével egyre több a napos órák száma és egyre intenzívebb a napsütés is. A szél által termelt energia a szélcsendes hónapokban elég alacsony. A biomassa által termelt energia mennyisége a napenergia mennyiségének arányában változik, amikor a napenergia mennyisége magas akkor a biomassa mennyisége alacsony, viszont amikor a napenergia mennyisége alacsony akkor a biomassa mennyisége magas.

4.3. A villamosenergia-rendszer stabilitása

"A villamosenergia rendszer fontos tényezője, hogy egy adott időpillanatban ugyanannyi energia termelődjön, mint amit a fogyasztók felhasználnak. A frekvenciaszabályozást primer (másodperces), szekunder (perces) és tercier (15 perces) szabályozók, menetrend-tartó gázturbinás erőművek, az alaperőművek visszatérhelése vagy energiatárolók végzik, így fontos tudni, hogy energiatárolók nélkül a fosszilis (hagyományos CO_2 kibocsátó) erőművek elengedhetetlen részei a stabil rendszernek." [16]

"A napenergia termelés a napsugarak beesési szögétől, a napsütéses órák számától és a direkt és szórt fény arányától is függ, így a termelt energia mennyisége közt jól megfigyelhető a szezonális." [16]



4.10. ábra. Napenergia termelés aránya [16]

"Az ábrán látható, hogy a napenergia csúcstermelés szempontjából releváns nyári órákban, 10:00 és 17:00 óra között 2018-ban 3,9%-át, 2019-ben 11%-át, 2020-ban pedig 17,6%-át

biztosították átlagosan a naperőművek az ország energiatermelésének. Az utóbbi években tehát dinamikus fejlődés látható, mely fejlődést a hálózatüzemeltetésnek is le kell követnie. Ezzel szemben a téli hónapokban a nyárihoz képest megközelítőleg harmada a napenergia részesedése a hazai áramtermelésből." [16]

2021. március 4-én reggel váratlanul jelentős forráshiány lépett fel a magyar villamosenergia-rendszerben, vagyis a betáplált energiamennyiség a vártnál jóval kevesebb lett a fogyasztási igényhez képest. A jelenség oka az volt, hogy a naperőművek valós termelése jóval kisebb volt a piaci menetrendben rögzített előzetes tervekhez képest. A napos időt előre jelző meteorológiai prognózissal szemben ugyanis az adott időszakban Európa nagy részét, így Magyarországot is szinte teljesen beborította egy majdnem teljesen összefüggő felhőréteg. "A naperőművek termelésének az előre bejelentetthez képesti jelentős elmaradása reggel 9 órakor kezdődött és mindössze tíz perccel később már 870 MW-on tetőzött, majd a délelőtti órákban végig kitartott, mielőtt a piac reagálni tudott rá. Az összességében tetemes, 860-870 MW-os forráshiány nagyságát jól érzékelteti, hogy a magyar villamosenergia-rendszer átlagos napi terhelése 6000-6500 MW (a 2021 februárjában született új történelmi rekord 7119 MW) - vagyis az eltérés ennek 13-14 százalékának felelt meg. Mivel a betáplálásnak folyamatosan egyensúlyban kell lennie a fogyasztással, a rendszerirányítónak azonnal pótolnia kellett a fellépő hiányt, amit a MAVIR a rendszerszintű szolgáltatások keretében éppen e célból leszerződött, illetve lekötött erőművi kapacitások aktiválásával meg is tett. A felhasznált tartalékok mellett, ezeken felül még elérhető volt közel 300 MW-nyi úgynevezett gyors reagálású forgó (aFRR) tartalék, vagyis a MAVIR egy nagyobb kiesést is képes lett volna kezelni a villamosenergia-rendszer folyamatos szabályozásával. Érdekes módon másnap reggel 8 órakor, tehát nem egészen egy nappal később viszont már 430-440 MW-os többlet mutatkozott a villamosenergia-rendszerben az előzetes menetrendekhez képest, 23 órán belül tehát a rendszer csaknem a teljes, szabályozási célra lekötött tartalék tartományt megjárta." [17]

"Az időjárásfüggő termelők termelése hatalmas ingadozásokat mutathat, nehezen előre jelezhető, az ebből fakadó tervezési pontatlanságok pedig egyre nagyobb feladatot rónak a rendszerirányítóra, akinek az esetleges termelési hiányt pótolnia kell a tartalék kapacitások bevetésével, a többletet pedig más erőművek lesabályozásával kell kezelnie." [17]

A napelemes rendszer termelési értéke nem folyamatos hiszen a nappali, délelőtti órák-

ban több energiát termel, mint a délutáni, esti órákban. Ezt az ingadozást kell stabilizálni, hogy a rendszer ne érezze meg a változást. A termelési mennyiség és a felhasználási mennyiség közötti különbséget is figyelembe kell venni. Például, ha egy napelemes rendszerrel működő háztartást veszünk figyelembe, akkor a délelőtti órákban megtermelt energiát nem feltétlenül használják el rögtön, ha a lakók nem tartózkodnak otthon. A délutáni órákban viszont amikor már otthon vannak, akkor a megtermelt mennyiség nem feltétlenül elég a felhasználni kívánt mennyiséghez képest. A rendszer stabilitásához egy energiatárolóra van szükség. A tároló a következő elven működne. Délelőtt amikor a termelés több, mint a felhasználás akkor a többletet a tároló tárolja. Délután amikor a fogyasztás több, mint a termelés akkor a tároló biztosítaná a felmerülő hiányt, azzal az energiával amit napközben eltárolt.

A tároló lehet akkumulátor vagy akár hidrogénnel működő rendszer. Hidrogén alapú villamosenergia-tároló berendezést összekapcsolják egy napelemes rendszerrel, és az általa megtermelt energiát gáz-hidrogén technológiával tárolják. Az itt tárolt energiát fel lehetne használni akár hidrogénautó töltésére is.

5. fejezet

Megújuló energiasztratégikák

5.1. Az Európai Unió energiasztratégikája

Az Európai Unió célja, hogy Európa 2050-re tiszta, megfizethető és biztonságos energiasz-ellátás révén klímabarát kontinenssé váljon. A Bizottság több energiaszügyi jogalkotási csomagot tett közzé. A célok közé tartozik például [18]:

- 2030-ra az épületek esetében a megújuló energiaszforrások részaránya 49% legyen
- a fejlett bioüzemanyagok és biogázok 2,2%-os részaránya 2030-ra
- a nem biológiai eredetű megújuló üzemanyagokra vonatkozó 2,6%-os célkitűzés
- a megújuló energiaszforrások általános érvényesítése a fűtési és hűtési ágazatban
- a megújuló energiaszforrások 14%-os részaránya a közlekedési ágazat teljes energiasz-igasztásában 2030-ra
- az EU megújuló tengeri energiaszforrásokból történő villamosenergia-termelését a 2020-as 12 GW-ról 2030-ra több mint 60 GW-ra, 2050-ig pedig 300 GW-ra növelje.

5.2. Magyarország energiasztratégikája

Magyarország főbb energiasz stratégiája, például [19]:

- A háztartások megújulóenergiaberuházásainak ösztönzése

- helyi, megújuló energiaforrásokra építő települési energetikai beruházások támogatása
- a rossz hatékonyságú biomassza-tüzelés modernizációja
- a villamosenergiaszektor szennyezőanyag-kibocsátásának csökkentése
- a távhőszektor zöldítése és versenyképessé tétele
- az elektromobilitási és alternatív üzemanyagtöltő-infrastruktúra fejlesztése
- a hazai fejlett bioüzemanyag-gyártás ösztönzése

A jövőben a napenergia még jobban előtérbe fog kerülni, hiszen a telepíthetősége széleskörű, szinte bárhová telepíthető. Napsugárzás mindig van csak az intenzitása változik.

2020-tól a kormány is támogatja a napelemes rendszerek kiépítését pályázatok által. Lakosság körében is elterjedt megújuló energiaforrás. Szélturbinát nem mindenhol lehet telepíteni, annak több szempontnak kell megfelelnie, mint egy napelemes rendszernek.

A közeljövőben a belső égésű motoros járművek legnagyobb részét (személygépkocsi) felfogja váltani az elektromos autó. Az elektromos autó vásárlását szintén támogatja a kormány így azoknak is lehetőségünk nyílik akik anyagilag nem tehetnék meg másképp. A támogatáson kívül egy másik érv az elektromos autó mellett, hogy a benzin és gázolaj ár növekedése drasztikus mértékben növekszik.

A napelemes rendszert és az elektromos autót lehet kombinálni. A napközben megtermelt többlet energiát egy tárolóban tárolva később felhasználhatjuk például az elektromos autónk töltésére.

Az elektromos autók népszerűsége nem csak Magyarországon, hanem az Európai Unióban is megfigyelhető. A közlekedést világ szinten szeretnék zöldíteni. Az EU-ban már vannak elektromos buszok, amikkel a tömegközlekedés által kibocsátott károsanyag mértékét szeretnék csökkenteni. A kibocsátott károsanyag koncentráció és mennyiség mellett még az üzemanyag magas világpiaci ára is az elektromos közlekedési eszközök preferálását segíti elő.

6. fejezet

Hidrogén

6.1. Hidrogénenergetika

A hidrogén a világon a leggyakrabban előforduló elem, színtelen, szagtalan gáz ami égéskor vizet képez. A hidrogént leggyakrabban kétféleképpen szokták előállítani: elektrolízissel vagy fosszilis üzemanyagokból. A legelterjedtebb módszer az elektrolízis, ahol elektromos áram segítségével a vizet hidrogénre és oxigénre bontjuk. Abban az esetben ha a felhasznált villamos energia az elektrolízis folyamatnál megújulóenergiaforrásból származik akkor ez a folyamat egy fenntartható energitermelést biztosít. A hidrogén üzemanyagcellákkal történő áramtermelés nem jár zajjal. Az üzemanyagcellák többféle méretben készülhetnek, ezért felhasználásuknak több, különböző módja lehetséges. A hidrogénnek viszont nem csak előnye de hátránya is van, mint például, hogy rendkívül gyúlékony, könnyen robban.

6.2. Európai hidrogénenergetikai megoldások

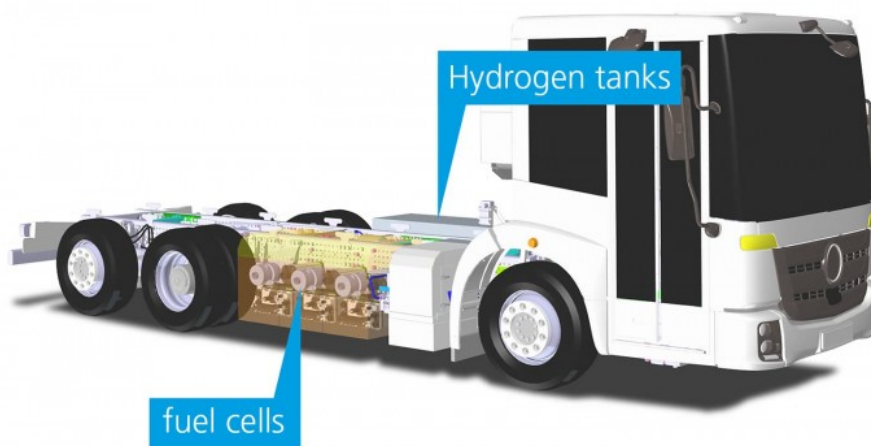
- „A norvégiai Utsira szigetén, az itt található kisméretű (250 fős) település energiaigényét szeles időben a két (egyenként 600 kW-os) szélerőmű elégíti ki. A rendszerben jelentkező, „többlet” villamos energia segítségével vízbontással hidrogént állítanak elő, amelyet $2400Nm^3$ mennyiségben tárolni tudnak. Kevésbé szeles időben a tárolt hidrogént egy hidrogénmotor és egy tüzelőanyag-cella alakítja át villamos energiává. Így a település energiaellátása teljesen autonóm, – elvileg – nem függ külső

forrásoktól és a környezetet sem terheli. Az eszközök gyártásától eltekintve, a normál működés elvileg zéró kibocsátású; a közösség kívülről nem zsarolható különböző „energiafegyverekkel” (lásd gázviták), a közösség függetlenítette magát a változó – jobbára emelkedő – fosszilis energiaáraktól, a jövedelmek is sokkal inkább helyben maradnak, mint az import energiahordozók vásárlása esetén.” [20]

- „Spanyolországban 2021-ben az Iberdrola nevű áramtermelő-szolgáltató vállalat a Fertiberia műtrágyagyártóval közösen a kontinens (egyelőre) legnagyobb zöldhidrogén-központját kívánja létrehozni. A 100 MW termelési kapacitású naperőműből, 20 MWh kapacitású, lítium-ion akkumulátoros puffertárolóból és 20 MW csúcsteljesítményű elektrolizálóból (vízbontó berendezésből) álló komplexum évi több mint 200.000 tonna hidrogént készít majd.” [21]
- Németországban 2017 novemberében hidrogén-üzemanyagcellás motorvonatot helyeztek üzembe. A jármű tetején helyezkednek el az üzemanyagcellák, a padlólemezek alatt pedig a többlet-energiát tároló akkumulátorok. A vonat fékezésekor is tölthetők az akkumulátorok.
- Skóciában 2014-ben már forgalomba álltak hidrogénnel hajtott autóbuszok. A hidrogénnel hajtott motor működése során nem bocsát ki szén-dioxidot vagy egyéb káros anyagot. Környezetbarát üzemanyagról abban az esetben beszélhetünk, ha a hidrogén előállításához használt elektromos áram egy megújuló energiaforrástól származik pl.: napelem, szélenergia.
- Több autógyártó cég gyárt hidrogén-cellás autót. Egyre több olyan üzemanyag-töltőállomás épült és épül ahol hidrogént is lehet tankolni. Németországban 66 darab működik és 7 darab működik tesztüzemben. Európa területén 101 ponton lehet hidrogént tankolni. Magyarországon 2021 áprilisában adták át az első mobil hidrogéntöltő-állomást, a Linde Gáz Magyarország Zrt. telephelyén.
- Egyre több ország rendőrsége rendelkezik hidrogén-üzemanyagcellás járművel. Berlinben és Londonban a Toyota által gyártott járműveket használják a rendőrök, Hamburgban a Mercedes GLC F-CELL biztosítja a hidrogénüzemű járművet.

- Már a légiközlekedésben is egyre több szerepet kap a hidrogén. Egy tüzelőanyagcellás rendszerek tervezésével és kivitelezésével foglalkozó cég sikeresen megépített egy hidrogén-hajtású drónt, amivel átrepültek egyik szigetről a másikra, körülbelül 70 kilométeres távolságot. Ezt a távot 1 óra 43 perc alatt tette meg a drón.
- Az Airbus 2035-ben szeretné szolgálatba állítani a hidrogén-üzemanyagcellás repülőit. A tervek szerint 100 illetve 200 utast tudnának szállítani. A hatótávolság függ a hajtómű típusától így jelenleg 1600 vagy 3200 kilométeres távolság lehetséges. Vegyes hajtóművel működnének a repülőgépek, a folyékony hidrogént átalakított gázturbinákban égetnék el, míg az áramellátást üzemanyagcellákkal oldanánk meg. [22]
- A dániai Aalborg városában hidrogéncellás autóbuszok álltak forgalomba, az üzemeltetésük minden szempontból zéró emissziós. Az autóbuszok töltése olyan töltőállomásokon történik ahol zöld árammal működik az elektrolízis ami során hidrogén állítódik elő. Teljes mértékben nulla a károsanyag-kibocsátásuk.
- 6.1. ábra: „Bár nem európai, de érdemes megemlíteni egy amerikai cég kukásautóit. Hajtásukról elektromotor gondoskodik, amelyhez a szükséges energiát három darab, egyenként 10 kW teljesítményű üzemanyagcella állítja elő fordított elektrolízissel, azaz a hidrogén oxigénnel történő egyesülésével, amelynek eredményeképpen elektromos áram keletkezik (a kipufogóból pedig csak vízgőz távozik). Az ily módon megtermelt áramot a jármű eltárolja a 85 kWh összteljesítményű akkumulátor csomagban (LiFePo vagy NMC), vagy felhasználja a folyamatos haladás érdekében. Az elektromos áram előállításához szükséges hidrogén tárolására összesen 7 tartály áll rendelkezésre, így az autó egy feltöltéssel 560 kilométert tud megtenni, ami meglehetősen kedvező érték egy tisztán akkumulátor technológiás kukásautó hatótávjával (kb. 100-250 km) szemben. Ezekkel a paraméterekkel 10 tonnányi szemetet képes elszállítani.” [23]
- „Az Anglo American globális bányaiipari vállalat 2030-ra 30 százalékkal szeretné csökkenteni károsanyag-kibocsátását, ezért elhatározta, hogy zöldebbé teszi a járműveit. Első lépésben egy dízel üzemű bányagépet alakítanak át a hidrogéncellássá. A bányagép átalakítása többlépcsős folyamat lesz, mivel egyáltalán nem hétköznapi, 290

tonnás járműről van szó. A munka első fázisában az oxfordshire-i Grove-ban ki-szerelik a dízelmotort, valamint az üzemanyagtartályt és a többi feleslegessé váló komponenst, majd beépítik az üzemanyagcellákat, a hidrogéntartályokat, a hűtő-rendszert, a hajtásláncvezérlőt, valamint az 1000 kWh összteljesítményű lítiumionos akkumulátorcsomagot, amely a bányagép hajtásához szükséges áramot fogja tárolni. Mindamellettt fékenergia-visszanyerő rendszerrel is ellátják, így a lejtőkön lefelé ha-ladva képes lesz elektromosságot termelni magának a lassítás, vagy fékezés során.” [24]



6.1. ábra. Vízgőzt pőfőgő üzemanyagcellás kukásautó [23]

7. fejezet

Energiaátalakítás

7.1. Power-to-Gas technológia

„A Power-to-Gas (rövidítve P2G illetve PtG) magyarra fordítva Villanyenergia gázzá konvertálása Ennek alkalmazásával a villamos energiából több lépésben gáznemű tüzelőanyagot állítanak elő, többnyire elektrolízis és kémiai, biológiai eljárások alkalmazásával. Ez a gáz sokkal egyszerűbben és gazdaságosabban tárolható, mint a villamos energia.” [25]

Főbb felhasználási területei [25]:

- üzemanyagként különösen gépjárművek, repülőgépek és hajók esetén
- vegyipari alapanyagként
- villamos generátorok hajtására is alkalmazható elsődleges tüzelőanyagként gázerőművekben, vagy gázmotorok hajtására
- reverzibilis tüzelőanyag-cellák üzemanyagaként
- földgázhoz hozzátáplálásra
- szintézisgázként közvetlenül felhasználva vagy metanol előállítására
- enzimek kaskádreakcióival etanol és propanol előállítására

Hidrogén vagy metán a leggyakrabban használt tüzelőanyag. Az elektrolízis folyamat során két fő termék keletkezik, ami a hidrogén és az oxigén. A villamos továbbító hálózatokat meglehetősen megterheli a napjainkban terjedő alternatív energiaalkalmazások

áramfelvétele, például a villanyautók, a hőszivattyús fűtési rendszerek. A P2G metán alkalmazásához a rendelkezésre álló, már kiépített földgáz-infrastruktúrát lehetne felhasználni, ezáltal [25]:

- ki lehet váltani a nem megújuló földgázt például a P2G metánnal, a fűtési rendszerek erre áthangolhatóak
- a smart grid rendszerekhez lehetne ezzel szállítani a tüzelőgázt, és a villamos energiát decentralisan ebből előállítani

Ebben az esetben a rendszer össz.-hatásfoka például az egyenáramú energiatovábbító rendszereket is meghaladná. [25]

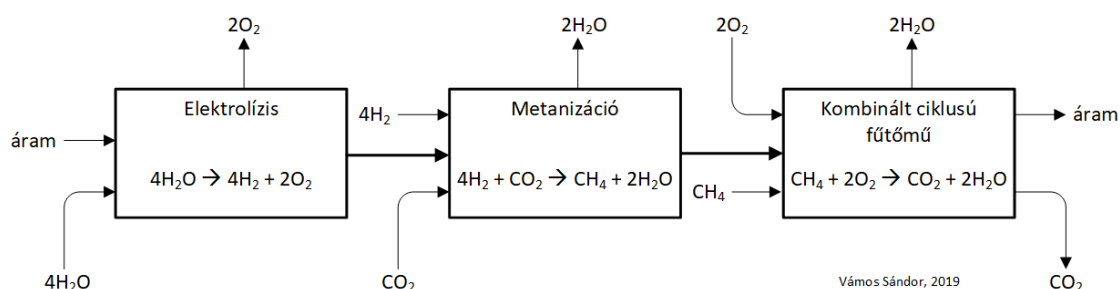
„Az energiatermelés és felhasználás kiegyensúlyozható P2G eljárásokkal. A csúcsidőn kívüli és többlet villamos energiából az eljárással hidrogén vagy metán állítható elő, ami energiaigény esetén, például csúcsidőben, vagy a megújuló források kiesése esetén ismét villamos energiává alakítható (sajnos ez az oda-vissza alakítás veszteséggel jár, ezt be kell kalkulálni a rendszer működésébe).” [25]

2013-ban 50% alatt volt a hatásfoka, a P2G technológián alapuló tárolórendszereknek. Napjainkban már meghaladhatja a 60%-ot, ennek ellenére még mindig jelentősebb a szivattyúturbinás rendszerek 70-80%-os hatásfoka.

Tüzelőanyag	Hatásfok	Körülmények
Konverzió: villanyáram → gáz		
Hidrogén	54-72%	200 bar nyomás
Metán (SNG)	49-64%	
Hidrogén	57-73%	80 bar nyomás (földgázvezeték)
Metán (SNG)	50-64%	
Hidrogén	64-77%	nyomás nélkül
Metán (SNG)	51-65%	
Konverzió: villanyáram → gáz → villanyáram		
Hidrogén	34-44%	80 bar nyomás és 60% villanyáram visszanyerés
Metán (SNG)	30-38%	
Konverzió: villanyáram → gáz → villanyáram + hőhasznosítás		
Hidrogén	48-62%	80 bar nyomás és 40-45% villanyáram / hő visszanyerés
Metán (SNG)	43-54%	

7.1. ábra. Teljes energiaátalakítási hatékonyság alkalmazott konverziók és tüzelőanyagok szerint [25]

„A P2G egyik – talán legkomolyabb – előnye, hogy fosszilis források nélkül képes tüzelőanyagot előállítani, így a felhasználás során felszabaduló széndioxid – a teljes folyamatot figyelembe véve – nem növeli a levegő széndioxid tartalmát, azaz a folyamat széndioxid (kibocsátás) semleges.” [25]



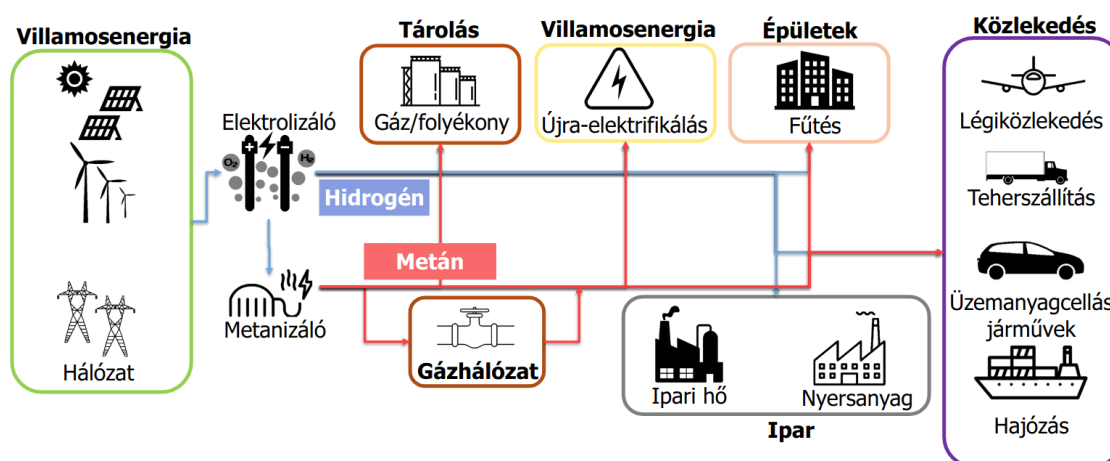
7.2. ábra. P2G szén-dioxid egyenlege [25]

Árak szempontjából, a P2G technológiával létrehozott áram még nem tudja felvenni a versenyt a többi piaci energiahordozóval.

Energiahordozó	Ára (adó nélkül)	Ára (adóval)	Egyéb adatok (fűtőérték)
Benzin (Super)	7,31 ct/kWh ^[13]	14,8 ct/kWh	8,77 kWh/kg
Dízel	4,73 ct/kWh ^[13]	12,2 ct/kWh	9,86 kWh/kg
Földgáz	2,19 ct/kWh ^[13]	8,2 ct/kWh ^[14]	10-13,9 kWh/kg
Áram	14,1 ct/kWh ^[13]	30,22 ct/kWh	
Hidrogén	12-20 ct/kWh ^[15]	28 ct/kWh	33,3 kWh/kg
P2G metán (2020) ^[16]	17-25 ct/kWh		15,39 kWh/kg
P2G metán (2030) ^[16]	13-20 ct/kWh		
P2G metán (2050) ^[16]	10-13 ct/kWh		

7.3. ábra. 2019-es német árak [25]

Környezetvédelmi szempontból is egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a megújuló energiaforrások. Az ipar törekszik arra, hogy minél környezettudatosabban állítjon elő villamos energiát. A cél, hogy a megtermelt villamos energiát tárolni is tudjuk. P2G ebből a szempontból is kedvező lehetőségeket kínál, hiszen gázzá alakítja a megújuló energiákat, így ezek a gázok már nem a villamoshálózatot terhelik, hanem a sokkal nagyobb és gazdaságosabb gázrendszerek tárolókapacitásait.



7.4. ábra. P2G és P2M folyamatok általános működése [26]

7.2. Alkalmazott eljárások

1. Áram $\Rightarrow$ metán

„Power to Methane eljárást első sorban vízbontáshoz használják. Metánná alakítják az elektrolízis révén nyert hidrogént, szén-dioxid hozzáadásával metanizációs eljárással. Ezt a gázt a földgázhálózatokhoz adagolják, ahonnan aztán a végfelhasználókon kívül például kombinált ciklusú erőművek is tüzelőanyagként veszik fel, illetve üzemanyagként is alkalmazható.” [25]

2. Szintetikus metán előállítása

A P2G-vel előállított szintetikus metángáz fontos szerepet tölt be a megújuló technológiák világában.

Ami mellette szól:

- tárolása alacsony költségű
- szállítható a hagyományos földgázvezetéseken
- a földgázhoz keverhető.

Az eljárás hatékonysága még növelhető, ha az előállítás során keletkező hulladékhő is felhasználásra kerül.

3. Elektrolízis

Elektrolízisnek nevezzük azt a folyamatot amikor elektromos áram hatására elektrokémiai folyamat megy végbe. A víz elektrolízise közben oxigén, hidrogén és hő keletkezik. Általában a P2G eljárások nem használják fel az oxigént.



ahol,

- H_2O a víz,

- H_2 a hidrogén,

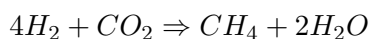
- O_2 a oxigén.

P2G fejlesztés fő célja az elektrolízis eljárás hatásfokának növelése és a hulladékhő arányának csökkentése.

4. Kémiai metanizáció

„A metanizációs eljárások célja az elektrolízissel előállított hidrogén és szén-dioxid felhasználásával metángáz előállítása. A metán a hidrogénnel szemben egyrészt kevésbé illékony (nagyobb a molekulamérete), így könnyebben és hatékonyabban tárolható, másrészt tüzelőanyagként / üzemanyagként könnyebben felhasználható a már meglévő infrastruktúrákkal is. Harmadrészt továbbalakítható etanollá vagy propanollá.” [25]

A metán előállítása a következő reakció alkalmazásával történhet:



ahol,

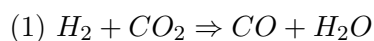
- H_2 a hidrogén,

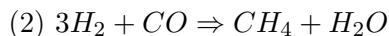
- CO_2 a szén-dioxid,

- CH_4 a metán,

- H_2O a víz.

A fenti reakció exoterm, hőfelszabadulással jár. Maga a reakció két rész-reakcióval írható le:





ahol,

- H_2 a hidrogén,

- CO_2 a szén-dioxid,

- CO a szén-monoxid,

- H_2O a víz,

- CH_4 a metán.

„Az első részreakció a WGS (Wassergas-Shift-Reaktion) endoterm, végterméke szén-monoxid és víz. A második részreakció egy Fischer–Tropsch-eljárással leírható exoterm folyamat, melynek eredményeként hő, metán és víz keletkezik. Amennyiben a reakció során keletkező hőt egyéb eljárásokra, például víz elgőzöltetésére használják el, az átalakítás hatásfoka akár 16%-kal növelhető. A berendezés üzemeltetése jól kombinálható biogáz és víztisztító berendezésekkel, ahol sok szén-dioxid keletkezik melléktermékként, és sok hőt (gőzt) igényelnek technológiai eljárásaikhoz.” [25]

5. Biológiai metanizáció

Elektrolízis segítségével állítjuk elő a metánt, ehhez a legtöbb esetben elektromos áramot használunk. Ügyelni kell a hőmérsékletre és a víz pH semlegességére. A bioreaktorban nem lehet a hőmérséklet szobahőmérsékletű vagy annál alacsonyabb. A folyamat során keletkező hidrogént a metanogén ősbaktériumok metánná alakítják át. A mikroorganizmusok alkalmazásával lehetőség nyílik arra, hogy a metanizáció alacsonyabb hidrogénkoncentráció esetén is végbemenjen. Ez az eljárás összetett, ezért több kisebb folyamat összessége. Első lépésben a metanogén ősbaktériumok a reaktort kolonizálják (mikroorganizmusok szaporodása, miután valamely gazdaszövethez vagy felülethez tapadtak [27]). A kolonizáció után a metanogén ősbaktériumok enzimeket választanak ki a katód felületén megtelepedve, így a folyamat végén a hidrogén metánná alakul.

6. Áram $\Rightarrow$ hidrogén

Elektrolízis alkalmazásával alakítják hidrogénné az áramot, ezt az átalakítást az esetek majdnem 100%-ban ezzel a módszerrel végzik. A Power-to-Gas technológia rész-

technológiája az elektrolízis, de önálló technológiaként is használható, hogy hidrogént állítsunk elő.

A meglévő infrastruktúra fejlesztésével a Power-to-Hydrogen (P2H) technológia számos felhasználási területen alkalmazhatóvá válik, akár iparban, közlekedésben, villamos-energia előállításban is nagy szerepet tölthet be.

7. Áram $\Rightarrow$ szintézisgáz

A szintézisgáz keletkezéséhez a metánnak a vízgőzzel reakcióba kell lépnie. Ehhez a reakcióhoz szükséges egy 1000°C -os nikkel katalizátor. Szintézisgáznak nevezzük a CO (szén-monoxid) és H_2 (hidrogén) bármilyen arányú elegye.[12] Ebből a gázból több szerves vegyület állítható elő, ezért a vegyipar számára is fontos alapanyag.

8. Áram $\Rightarrow$ etanol/propanol

Az etanol és a propanol nagyon fontos és keresett alapanyaga a vegyiparnak. Több Power-to-Gas-al kapcsolatos kutatás célja, ezeknek az alapanyagoknak az előállítása. A bochumi Ruhr Egyetem és az Új-Dél-Wales Egyetem közös munkájának köszönhetően egy olyan eljárást találtak ki, ami szerint meghatározott enzimek kaszád-reakcióival közvetlenül illetve biológiai úton is létrehozható az etanol és a propanol a Power-to-Gas termékeként.

8. fejezet

Tüzelőanyag-cellák

8.1. Tüzelőanyag-cellák alapok és működési elvek

Tüzelőanyag-cella angolul „fuel cell”, németül „brennstoffzelle” néven ismert. Magyar nyelvben több néven is ismert, mint például „üzemanyag-cellának”, „tüzelőanyag-elem”.

A tüzelőanyag-cellák olyan áramforrások amik elektrokémiai elven működnek. Működésük azon az elven alapul, hogy a betáplált üzemanyag vegyületeiben általában a hidrogénben tárolt kémiai energiát elektromos energiává alakítják egy lépésben. A folyamat melléktermékeként hő keletkezik.

A működési elvükből is következik, hogy a tüzelőanyag-cellák a Galván elemek csoportjába tartoznak. Ebbe a csoportba tartoznak az egyszer használatos szárazelemek, lítium-ion akkumulátorok amik akár többször is feltölthetők.

Egy tüzelőanyag-cella addig működik folyamatosan ameddig a betáplálás folyamatosan történik, ez a tulajdonsága előny a többi Galván elemmel szemben.

Elektrokémiai áramforrások működésének lényege, hogy a negatív elektródon (anód) elektronleadás (oxidáció) történik miközben a pozitív elektródon (katód) elektronfelvétel (redukció). A két elektródot összekötő fémes vezetőn jutnak el az elektronok az anódtól a katódig. Az elektronokkal munkát lehet végeztetni, aminek a nagysága több tényezőtől is függ, mint például a két elektród közötti potenciálkülönbség és az áthaladt töltések mennyisége.

A tüzelőanyag-cellák esetén a Gibbs-féle (Willard Gibbs, amerikai fizikokémikus) szabadentalpia-változás határozza meg a hatásfok értékét.

$$G = H - TS$$

ahol,

- G a Gibbs-féle szabadenergia, szabadentalpia,
- H az entalpia,
- T az abszolút hőmérséklet,
- S az entrópia, a rendszer mozgásszabadsága, rendezetlensége.

A tüzelőanyag-cellák legnagyobb előnyéhez tartozik, hogy magas a hatásfokuk és nagyon alacsony a kibocsátásuk. Abban az esetben ha a tüzelőanyag-cella üzemanyaga hidrogén, akkor a helyi kibocsátás vízgőz. Az esetek másik felében, amikor a tüzelőanyag-cella betáplált üzemanyaga metán, propán, metanol vagy más szénhidrogén, akkor a kibocsátott legszennyező anyag mennyisége eltörpül a hagyományos energiatermelők kibocsátásához képest.

8.2. A tüzelőanyag-cella veszteségei

Veszteségek [28]:

1. Belső ellenállás

Az üresjárási feszültséget csökkenti a cella belső ellenállása.

$$U_k = E_0 - I * R_b$$

ahol,

- U_k a cella kapocsfeszültsége,
- E_0 a cella elektromotoros ereje,
- I a vezetőn átfolyó áram erőssége,
- R_b a cella belső ellenállása.

A belső ellenállás miatt kialakuló veszteség: ΔU_{Rb}

2. Elektrolit ionkoncentrációja

Az ideális üzemeltetési körülményektől való eltérés nagyban befolyásolja a cellafeszültséget, mint például az elektrolit ionkoncentrációja. Nernst egyenlettel írható le az elektródpotenciálra gyakorolt hatása.

$$E = E_0 - \frac{RT}{zF} \ln c$$

ahol,

-E az elektródpotenciál,

- E_0 a cella elektromotoros ereje,

-R az egyetemes gázállandó,

-T az abszolút hőmérséklet,

-z a töltésszám,

-F a Faraday-állandó.

A Nernst-veszteség miatt kialakuló veszteség: ΔU_N

3. Elektron átlépési veszteség

Az elektróda-elektrolit határon való elektronátlépés során kialakult feszültségesés:

$$\Delta U_D$$

4. Diffúziós veszteség

A tüzelőanyag bevezetése során több gáz kerül az elektródához, mint amennyi az elektrokémiai reakció során elfogy.

Diffúziós veszteség: ΔU_{Diff}

Mindent figyelembe véve az U_Z kapocsfeszültség körülbelül 0,8V. A nagyobb feszültség elérése érdekében több cellát sorba kapcsolnak.

A felsorolt veszteségek az áramsűrűség-feszültség diagrammban láthatóak.

Terhelő ellenállások közbeiktatásával tovább csökkenthető a kapocsfeszültség.

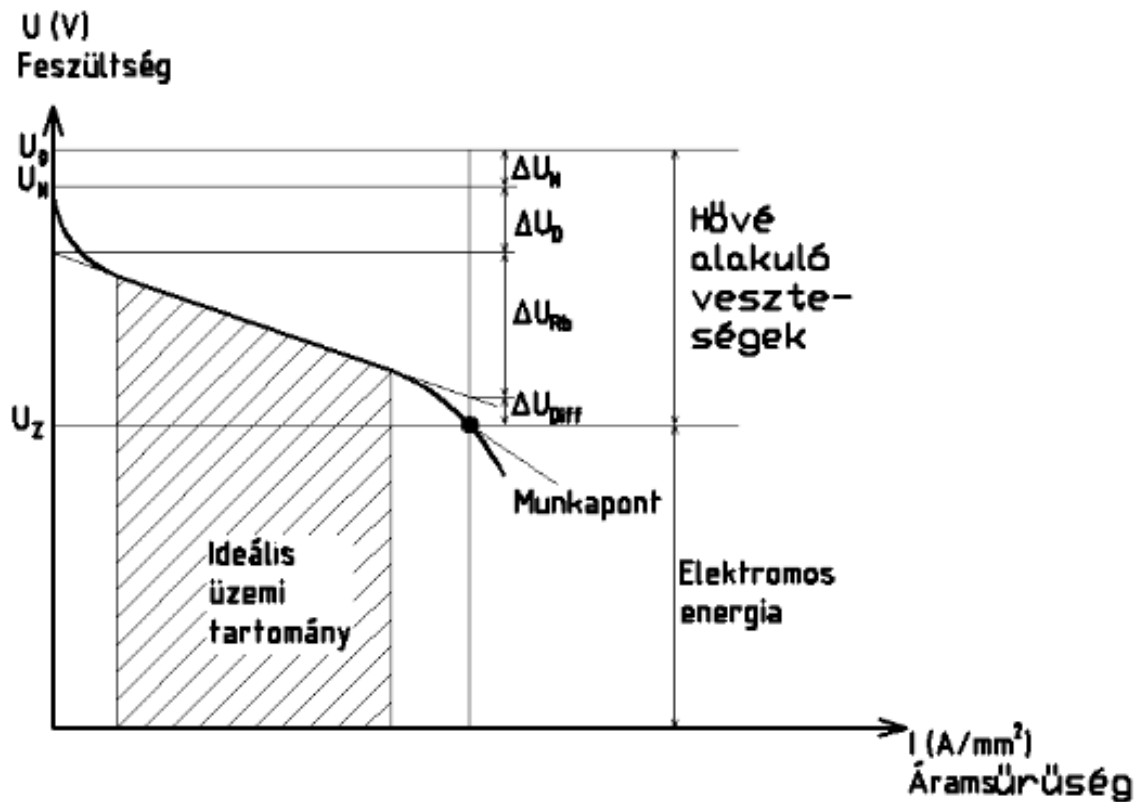
$$U'_k = U_k - I * R_t$$

ahol,

- U_k a cella kapocsfeszültsége,

-I a vezetõn átfolyó áram erõssége,

- R_t a terhelõ ellenállás.



8.1. ábra. Áramsűrűség-feszültség diagramm [29]

8.2.1. A tüzelőanyag-cella hatásfoka

Hatásfokok [28]:

A tüzelőanyag-cella összhatásfoka:

$$\eta_{\text{ö}} = \eta_{th} + \eta_E + \eta_F$$

ahol,

- $\eta_{\text{ö}}$ az összhatásfok,

- η_{th} a termodinamikuss hatásfok,

- η_E az elektromos hatásfok,

- η_F a Faraday-hatásfok.

A termodinamikuss hatásfok η_{th} :

A bevitt kémiai és a kinyerhető villamos energia arányát mutatja meg.

Hidrogén: $\eta_{th}=94\%$

Metán: $\eta_{th}=100\%$

- Elektromos áram szolgáltatás hordozható készülékektől egészen az erőművekig.
- Elszigetelt elektromos berendezések működtetése.
- Kogenerációs erőművek (hő és villamos energia egy berendezésben) épületeknél és házaknál.
- Közlekedés (autó, busz, motor, teherautó, vonat, repülő, hajó, stb.)
- Hordozható elektronika.

Jelenleg a forgalomban rengeteg típusú tüzelőanyag-cella van, a leggyakrabban előforduló típusok jellemzőit a következő felsorolás foglalja össze:

- AFC: Alkálikus tüzelőanyag-cella (Alkaline fuel cell): a legelső cella típusok egyik ez a cella típus. Az 1960-as években használták az Apollo űrhajókban és az űrkompokban. Felépítésüket tekintve azbeszt-szeparátoros alkálikus H_2/O_2 tüzelőanyag-cellák melyek kálium-hidroxid elektrolitot tartalmaznak. Ami az előnyüknek számít, hogy kiváló a hatásfokuk és olcsó a katalizátoruk. Viszont ami a hátrányuk közé sorolható, hogy igen tiszta input gázokat igényelnek, nem elég a betáplált hidrogénnek tisztának lennie hanem az oxigénnek is annak kell lennie. Ez mind abból adódik, hogy nagyon érzékenyek szén-dioxidra. Napjainkban már csak speciális alkalmazásokban találhatóak meg.

Paraméterek [32]:

- Elektrolit típusa: tömény folyékony foszforsav
- Működési hőmérséklet: $150^\circ C - 220^\circ C$
- Elektromos hatásfok: 50%-60%

Reakciók [32]:

- Anódon: $2H_2 \Rightarrow 4H^+ + 4e^-$
- Katódon: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \Rightarrow 2H_2O$
- A teljes reakció: $2H_2 + O_2 \Rightarrow 2H_2O$

Előnyei [32]:

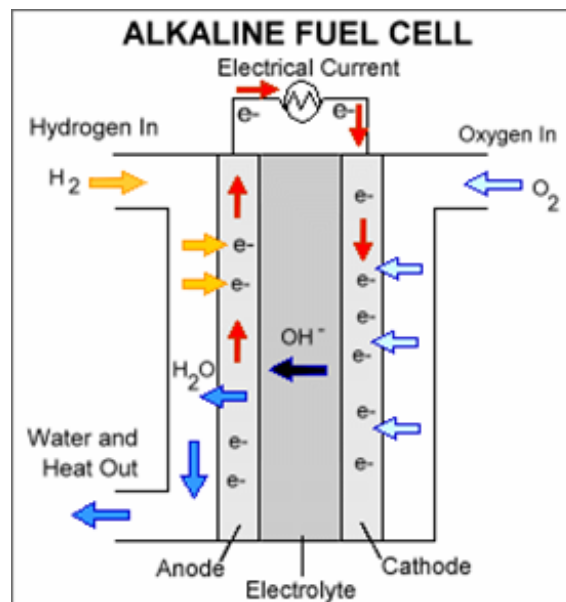
- A magas működési hőmérséklet hatékony hőhasznosításra ad lehetőséget
- Érzéketlen a szén-dioxidra és a szén-monoxidra
- Hosszú élettartam (A foszforsav illékonysága nagyon alacsony)
- Stabilitás
- Egyszerű felépítés

Hátrányai [32]:

- Nagy méret
- Platina katalizátor szükséges
- Nehezen indítható (A foszforsav 40°C alatt szilárd)

Felhasználási területek [32]:

- Épületek energiaellátása
- Erőművek
- Hadiipar



8.3. ábra. Alkáli Elektrolitos Cellák [32]

- PEMFC: Protoncserélő-membrános tüzelőanyag-cella (Proton exchange membrane fuel cell): ezenek a celláknak a legfontosabb alkotó eleme az 1,0mm-nél vékonyabb, hidratált protoncserélő membrán. Ez a membrán csak a hidrogén-ionokat engedi át azaz a protonokat. Porózuskatalizátorral vonják be a membrán mindkét oldalát. Ez az anyag általában platina. A membrán két ellentétes oldalán vezetik be a cellába a hidrogént és az oxigént. A hidrogénből hidrogén-ion, az oxigénből hidroxidion keletkezik. A hidrogén-ion a membránon áthaladva a membrán másik oldalán vízzé egyesül a hidroxidionnal.

A PEM cellák fő alkalmazási szempontja, hogy gyors teljesítményingázásokra képes és gyors többszöri ki- és bekapcsolással is működik. Hátránya, hogy a benne lévő platina katalizátor nagyon érzékeny bizonyos szennyezésre, mint például a szén-monoxid. Emiatt tiszta hidrogénre van szüksége illetve, hogy a membrán megfelelő nedvességű legyen.

Előnyét és hátrányát együttesen nézve is ez a cella típus a legígéretesebb a várható tömeggyártásban. A jelenlegi piacon ez a cella típus a legkeresettebb, világszinten nézve is.

PEM típuson belül két alcsoportot különböztetünk meg. Az egyik az alacsony ($50-90^{\circ}C$) hőmérsékleten működő alcsoport, a másik a magas ($120-180^{\circ}C$) hőmérsékleten működő. A magas hőmérsékleten működő PEM cella előnye, hogy kevésbé érzékeny az input gázok szennyezéseire és a hatásfoka magasabb. A hátránya viszont, hogy drágább.

Paraméterek [32]:

- Elektrolit típusa: protonáteresztő membrán
- Működési hőmérséklet: $70^{\circ}C - 220^{\circ}C$
- Elektromos hatásfok: 40% - 50%

Reakciók [32]:

- Anódon: $2H_2 \Rightarrow 4H^+ + 4e^-$
- Katódon: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \Rightarrow 2H_2O$

- A teljes reakció: $2H_2 + O_2 \Rightarrow 2H_2O$

Előnyei [32]:

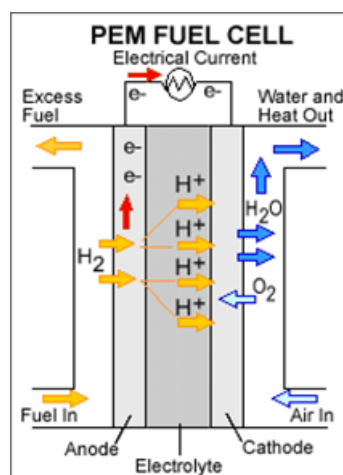
- Hatékony
- Olcsó az előállítása a szilárd elektrolit miatt
- A szilárd elektrolit miatt nem érzékeny a gravitációra
- Gyors indulás
- Hosszú élettartam

Hátrányai [32]:

- Körülményes szabályozás (az elektrolitot nedvesíteni kell)
- Az alacsony működési hőmérséklet miatt kicsi a hőhasznosítás hatásfoka

Felhasználási területek [32]:

- Járműipar
- Hadiipar
- Hordozható áramforrások
- Erőművek



8.4. ábra. Protoncsere Membrános Cella [32]

- DMFC: Direkt-metanol tüzelőanyag-cella (Direct Methanol Fuel Cell): a cellák csoportosításakor ezt a cella típust nem tekintik különálló típusnak, a PEM típus egyik alkategóriájaként tekintik. Ez a cella típus is olyan hőmérsékleten üzemel mint az alacsony hőmérsékletű PEM és szintén polimer membránt tartalmaz. Előnye, hogy a metanol híg oldata az input üzemanyaga, ami nagy energiasűrűségű viszont könnyen kezelhető és hosszú ideig szolgáltat energiát. Hátránya, hogy elég alacsony a hatásfoka ami 10-20%. A piaci kereslete alacsony.
- PAFC: Foszforsavas tüzelőanyag-cella (Phosphoric acid fuel cell): ez egy olyan cella típus ami körülbelül 160-220°C-os tartományban működik. Alacsony sebességgel terhelhetőek fel illetve le is. Ez a cella típus eléggé alkalmatlan kisebb teljesítménytartományokban, mint például az épületenergetika vagy a mobil alkalmazások. Alkalmazásuk inkább az energiatermelő kategóriában megfelelőek.

- MCFC: Olvadék-karbonátos tüzelőanyag-cella (Molten carbonate fuel cell): ez a cella típus magas hőmérsékleten működnek azaz 600-700°C körül. Előnye, hogy kevésbé érzékeny az input anyagok minőségére. Az input anyag több féle is lehet: hidrogén, földgáz, biogáz, szintézis gáz, metanol vagy más szénhidrogének. Annak ellenére, hogy az input anyag lehet szénhidrogén, még ebben az esetben is a kibocsátott légszennyező anyagok mennyisége nagyon alacsony. Magas hőmérsékleten is működik.

Felhasználás szempontjából mivel magas hőmérsékleten működnek, így folyamatos üzemben használják, ezért is alkalmas erőművekben, például egy gőzturbinás, kétlépcsős blokkfűtő erőműben. Iparban is lehet használni, a fő szempont, hogy folyamatos üzemben használják, mert a sok be- és kikapcsolást nem bírja.

MCFC cella felhasználása a jövőben akár egy meglévő gyár környezetbarátabbá tételében is nagy segítség lehet. Például egy már üzemben lévő vasgyár modernizálása a következőképpen történhetne. A gyár tetőszerkezetére egy napelemes rendszert lehetne telepíteni, ami biztosítaná az energiát az elektrolízátor működéséhez. Az elektrolízátor által termelt hidrogénnel tudnánk az MCFC cellát üzemeltetni. A cella biztosítaná a gyár működéséhez szükséges áramot és a melléktermékként termelt hőt pedig a hőkamrában lehetne hasznosítani.

Paraméterek [32]:

- Elektrolit típusa: olvadt lítium-, nátrium- és kálium-karbonát
- Működési hőmérséklet: 600°C felett
- Elektromos hatásfok: 50%-60%

Reakciók [32]:

- Anódon: $\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2e^-$
- Katódon: $\text{CO}_2 + 1/2\text{O}_2 + 2e^- \Rightarrow \text{CO}_3^{2-}$
- A teljes reakció: $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{CO}_2(\text{katód}) \Rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2(\text{anód})$

Előnyei [32]:

- A magas működési hőmérséklet miatt nincs szükség üzemanyag reformerre
- A magas működési hőmérséklet hatékony hő hasznosításra ad lehetőséget
- Olcsó alapanyagok

Hátrányai [32]:

- Érzékeny a korrózióra
- Lassú indulás
- Körülményes a szén-dioxid áramlásának szabályozása

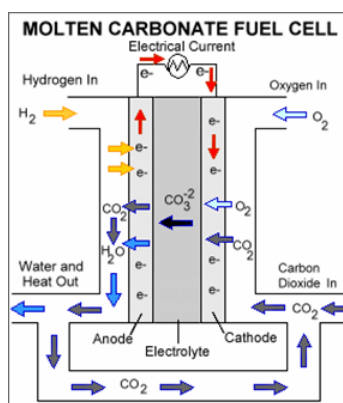
Felhasználási területek [32]:

- Erőművek
- Ipari felhasználás

Az MCFC technológia előnyei [32]:

- a 650°C működési hőmérsékletből adódóan a reformer folyamathoz szükséges hőt és hőmérsékletet a tüzelő anyag-cella saját maga megtermeli, tehát a hő hasznosítás részben a berendezésen belül megvalósul
- a működési hőmérséklet nagyságából adódóan a berendezés hagyományos anyagokra épül, tehát mesterségesen előállítható kerámiák alkalmazása nem szükséges

- a kilépő füstgáz hőmérséklete 400°C , ami rugalmas, könnyen kezelhető hő hasznosítási lehetőséget eredményez
- a belső tüzelőanyag előállítása a berendezésen belül elhelyezkedő reformer egységen keresztül történik, amelynek kivitelét az alkalmazásra kerülő primer tüzelőanyag fajtája határozza meg
- decentralizált rendszerek kiépítésének ideális eszköze
- jelentős, 40-100%-ig terjed a teljesítmény-szabályozás átfogási tartománya, miközben a villamosenergia-termelés hatásfoka nem csökken, a hő leadás mértéke pedig arányosan változik
- adott alkalmazási körülményekhez illeszkedő primer energiaellátást tesz lehetővé
- a szennyvíz- és egyéb hulladékkezelési technológiák során felszabaduló depónia- és biogáz gazdaságos és egyben környezetkímélő hasznosításának innovatív technológiai eljárása
- biogáz alkalmazása esetén - a CO_2 jelenléte miatt - a villamosenergia-termelés hatásfoka nő a földgázzal történő üzemvitelhez képest.
- alacsony zajszint mellett üzemel, a költséges zajcsillapító burkolat kiépítése nem szükséges
- üzemeltetési költsége alacsony, gyakorlatilag a tüzelőanyag és az indítási és leállítási folyamathoz szükséges segédgázok ára
- az eddigi üzemeltetési tapasztalatok szerint karbantartást nem igényel



8.5. ábra. Olvadt Karbonátos Cella [32]

- SOFC: Szilárd-oxidos tüzelőanyag-cella (Solid oxide fuel cell): ez a cella típus is magas hőmérsékleten működik, azaz $500-1000^{\circ}\text{C}$. Az elektrolit ebben az esetben szilárd, porózus kerámia anyag, mint például az ittriummal stabilizált cirkónium-dioxid. Ez a típus hosszú beüzemelési idejű, lassú teljesítményváltozásra képes. A hatásfoka viszont magas. Az üzemeltetéséhez nem szükséges tiszta hidrogén, hanem akár hidrogént tartalmazó vegyületek (szénhidrogének) is megfelelőek. Értékesítés szempontjából a második helyen áll a PEM típusú cella mögött.

Paraméterek [32]:

- Elektrolit típusa: pl. Szilárd cirkónium-oxid
- Működési hőmérséklet: $600^{\circ}\text{C}-1100^{\circ}\text{C}$
- Elektromos hatásfok: 60%-65%

Reakciók [32]:

- Anódon: $2\text{H}_2 - 2\text{O}^{2-} = 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^{-}$
- Katódon: $\text{O}_2 + 4\text{e}^{-} \Rightarrow 2\text{O}^{2-}$
- A teljes reakció: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \Rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Előnyei [32]:

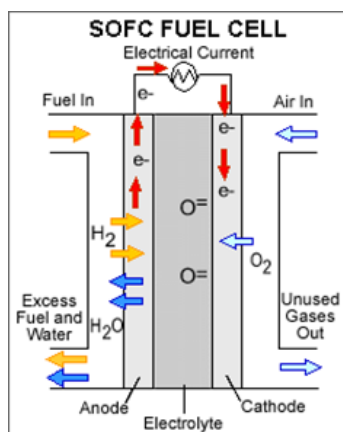
- Magas elektromos hatásfok
- Gőzturbinával akár 70% fölé is növelhető a hatásfok
- A magas hőmérsékletnek köszönhetően nem érzékeny az üzemanyag minőségére

Hátrányai [32]:

- Lassú indulás
- Lassú reagálás az áramigények megváltozására
- Az extrém hőmérsékletek miatt drága alapanyagok

Felhasználási területek [32]:

- Erőművek



8.6. ábra. Szilárd Oxidos Cella [32]

– Ipari felhasználás

A szakirodalom több tüzelőanyag-cella típust megemlíti ezeken a felsoroltakon kívül, mint például a direkt etanolos tüzelőanyag-cella (DEFC), ami szintén a PEM típus altípusának számít. A következő típus is PEM altípus egyik típusa, a hangyasavas tüzelőanyag-cella (DFAFC).

A tüzelőanyag-cellák területén is nagy erővel folynak kutatások, hogy a cellák hatásfokát növelni lehessen illetve, hogy az élettartamukat hosszabítani tudjuk.

Másik dolog amit fontos még megemlíteni, hogy moduláris jelleggel bővíthetők a tüzelőanyag-cellák, így a világon 2019-ben a legnagyobb tüzelőanyag-cellás erőmű Dél-Koreában üzemel $59MW_e$ teljesítményen.

8.4. PEM tüzelőanyag-cella alkalmazása

A tüzelőanyag-cellákat ma már széles körben használják. Helyettesíteni lehet velük elemet, akkumulátort vagy akár áramfejlesztőt. Alkalmazhatják még hő- és áramtermelő berendezésekben is.

Napjainkban is zajlanak kutatások a lakásokhoz alkalmazható PEM-áramfejlesztő rendszer tervezésével kapcsolatban. Földgázból előállított hidrogén az üzemanyaga. Az akkumulátorok akkor kapcsolnak be amikor csúcsfogyasztás van. Ezek az akkumulátorok akkor töltődnek fel, amikor az áramtermelő alapkapaacitása meghaladja a fogyasztást, tehát akkor amikor többet termel a rendszer, mint elhasznál.

A megújuló energiaforrások által megtermelt energia mennyisége nem mindig ugyanannyi, hiszen a nap nem süt mindig ugyanúgy, a szél nem fúj mindig ugyanakkora sebességgel. Ezt az energia ingadozást energiatárolókkal lehet megoldani, bennük lehet tárolni az energiát, amíg a termelés nagyobb, mint a fogyasztás. Ilyen energiatároló például a tüzelőanyag-cella.

A jövőben még nagyobb szerepe lesz a környezetkímélő technológiáknak. A cél, hogy minél környezetbarátabb módon termeljük meg a szükséges villamosenergiát. Az egyik lehetséges irány, ha a megújuló energiaforrások által megtermelt energiát a tüzelőanyag-cellák segítségével tároljuk. A villamoshálózat terheltségét azzal is tudjuk csökkenteni, ha a helyben termelt villamos energiát helyben fogyasztjuk el, így nincs szükség az energia szállítására.

Nagy előrelépés lenne, ha minden háztartásban működne egy kisebb napelemes rendszer tüzelőanyag-cellás kombinációval. A rendszer lényege, hogy napelemes rendszerrel és az általunk megtermelt hidrogénnel a Napból nyert energia költsége majdnem ugyanannyi lenne, mint a hálózatról vett energiáé.

A rendszer alkotó elemei: több napelemes kapacitás, akkumulátor tárolóval és egy hidrogén termelő egység. Ilyen egység lehet akár egy elektrolizáló cella is. Ami még a rendszer egyik eleme lehet, de nem szükséges csak, ha jobb rendszert szeretnénk kiépíteni, egy hidrogén tárolására alkalmas egység. Amennyiben nincs a rendszerben tüzelőanyag-cella úgy nem tudjuk a tárolt hidrogént visszaalakítani villamos energiává. Abban az esetben ha nincs, akkor a hidrogént elégetjük, így fűtést segítés és melegvíz szempontjából tudjuk hasznosan felhasználni. Ez a komplett rendszer a tüzelőanyag-cellák nélkül már egy meglévő rendszer, amit Dr. Kiss Zoltán magyar fizikus dolgozott ki.

Figyelembe véve a napelemek és a hidrogén termelési technológia élettartamát ezzel a rendszerrel akár 30 éves üzemidő is elérhető.

Ez a rendszer még nem független a vezetékes energetikai rendszerektől, de további fejlesztéssel akár önálló rendszer is létrehozható.



8.7. ábra. A REBOX „szekrényének” gáz-és villamos-oldaliberendezései [33]

9. fejezet

Hidrogén energia

9.1. Hidrogén energia felhasználásának lehetőségei

A hidrogén energiát több módszerrel lehet felhasználni, attól függően mi a végső célunk vele. A cél lehet az ipar zöldítése, közlekedés környezetbarátabbá tétele vagy áram termelése. Azt, hogy melyik felhasználás a leghatékonyabb azt több szempotból kell vizsgálni. A szempont lehet a környezetre gyakorolt hatása, az energiaellátás vagy a megújuló energiától való függése. A jelentősen megnövekedett energia használat megköveteli a környezetbarát technológiák és folyamatok fejlesztését. Ebben a „Power-to-Gas” folyamat jelentős szerepet fog játszani. Az eljárás célja a szél- és napenergia tárolása hidrogénné vagy metánná alakítva.

9.2. Hidrogén energiapark

A németországi Mainz-ban található egy energiapark, ahol hidrogént állítanak elő és szállítják el további felhasználásra. A hidrogén előállítása elektrolízissel történik. Az ehhez szükséges energiát részben a szomszédos szél erőművek többletteljesítménye biztosítja. "Az elektrolizátorok modern PEM-elektrolízis technológiát használnak. Ez rendkívül dinamikus rendszerműködést tesz lehetővé, amely ingadozó megújuló energiaforrásról történő tápellátás esetén kötelező. Az ott létesített rendszerben a leírt PEM-elektrolizátorok közül hármat üzemeltetnek, egyenként akár 2 MW csúcsteljesítménnyel. A PEM-elektrolizátorok üzemeltetése ebben a teljesítménykategóriában világszerte elsőnek számít, ugyanis eddig

csak kisüzemi hidrogéntermelésre használták a PEM-alapú rendszereket. A rendszer további lényeges elemei közé tartozik a kétfokozatú ionkompresszor, a gáztáp, a töltőberendezések és a kapcsolóberendezés. A Linde által kifejlesztett „ionos kompresszor” a megtermelt hidrogént sűríti, így tárolótartályokba, gázcsövekbe és tartálykocsikba tölthető. Eddig ezt a technológiát főként hidrogén-töltőállomásokon használták, de jelentős előnyöket kínál az energiapark számára is.” [34]

A hidrogén könnyen tárolható és különféle alkalmazásokban felhasználható energiaforrásként. A Mainzban termelt gázt tartálykocsikkal el lehet szállítani hidrogéntöltő állomásokra, ahol környezetbarát üzemanyagként használják fel károsanyag-kibocsátásmentes üzemanyagcellás járművekhez.[35]

A szél és a napsugárzás nem folyamatos, és csak átmenetileg elérhető. Ezért a szél- és napenergia-rendszerekből származó energiát úgy kell átalakítani, hogy szükség esetén tárolható és felhasználható legyen. Hidrogén elektrolízissel bárhol előállítható, csak elektromos áramra és vízre van szükség. Az üzemanyagcellában a hidrogén közvetlenül és rendkívül hatékonyan alakítható elektromos energiává – égési hő vagy mechanikai energia vesztesége nélkül, de akár a hidrogént gázerőművekben is fel lehet használni elektromos áram előállítására. A hidrogén lehetővé teszi a zöld villamos energia közvetett felhasználását üzemanyagcellás járművek üzemanyagaként, emellett fontos ipari gáz is. [36]

Hidrogén energiapark részei:

- Elektromos hálózati csatlakozás: közvetlenül kapcsolódik a középvezettségű hálózathoz és egy szomszédos szélerőműhöz. Az elektromos energia decentralizált tárolását erős szél betáplálás idején a megújuló energia hálózati integrációjára használják, és garantálják a hálózat stabilitását.

Feszültség szint: 20kV

Szélerőmű elektromos kimenete: 4x2MW

Vezérlő panelek száma: 7

Belső fogyasztású transzformátor: 1000kVA

- Egyenáramú állomások: Három egyenáramú állomás állítja elő az elektrolízis folyamatához szükséges nagy egyenáramot. Az ehhez szükséges villamos energiát az egyes

állomások közvetlenül a közép feszültségű hálózatról nyerik GEAFOL öntöttgyanta transzformátorok segítségével. Az áramot az iparban bevált SINAMICS inverteres szekrények fordítják meg. A nem kívánt nagy hálózati interferenciát egy integrált többfokozatú szűrőáramkörü rendszer akadályozza meg. [37]

Névleges egyenáramú teljesítmény: 2MW

Állomásonkénti maximális kimeneti áram: 3500 A DC

Bemeneti feszültség: 20 kV 3-ph

- Víz tisztító üzem: Az elektrolízis folyamatához desztillált víz szükséges. Az ilyen nagyon nagy tisztaságú víz előállításához a víz tisztító üzem több lépésben kinyeri a normál csapvízben található összes oldott ásványi anyagot. A puffertartály biztosítja az elektrolízis folyamatának folyamatos vízellátását még leállások idején is. Például a víz tisztító telepen végzett karbantartási munkák során is. [37]

Maximális vízfogyasztás: $1\text{ m}^3/h$

- Elektrolízis rendszer: Három proton áteresztő membrán (PEM) technológiával felszerelt SIFYZER 200 elektrolizátor elektromos egyenárammal bontja fel a vizet hidrogénre és oxigénre. Az elektrolizáló cellákban használt protonvezető membránok megbízhatóan elkülönítik egymástól a gázokat és magas biztonsági szintet kínálnak, a megújuló cellakialakításnak is köszönhetően. [37]

Az új Siemens fejlesztés sajátosságai:

Nagy teljesítmény: folyamatos működés 1,3 MW csúcsteljesítménnyel, elektrolizátoronként 2,0 MW-ig.

Rendkívül dinamikus reakció: felfutás másodpercek alatt, tág határok között részterheléses működésre képes.

Nagy nyomás: 35 bar kimeneti nyomás nagy karbantartást igénylő mechanikus tömörítés nélkül.

- Gázkondicionálás és tárolás: Az elektrolizátorokból származó nyers hidrogént először egy katalizátoron eresztik át, hogy a maradék oxigént vízgőzzé alakítsák. A nedvesség nagy része a tömörítés előtt és után kondenzálódik, és visszakerül az elektrolizálóba. A hidrogént a nyomástartó tartályokban tárolják.

Tárolási mennyiség: $2 \times 82 \text{ m}^3$

Tárolási nyomástartomány: 20-80 bar

Nettó tárolókapacitás: 780 kg/ 26MWh

Bemeneti gáz minősége: $< 0.5\% \text{ O}_2$, $< 3.0\% \text{ H}_2\text{O}$

Kimeneti gáz minősége: $< 0.0002\% \text{ O}_2$, $< 0.0005\% \text{ H}_2\text{O}$

- Befecskendezés: Az energiaparkban megtermelt hidrogént a Stadtwerke Mainz nagy-nomású földgázhálózatába lehet befecskendezni. Ez a folyamat a fosszilis földgázt helyettesíti. A megtermelt hidrogénnel részben ellátható minden földgázhálózathoz kapcsolódó rendszer, mint például fűtési rendszerek, gázégők, hőerőművek és gázerőművek. [37]

Bemeneti oldal nyomása: 20-80 bar

Gázrács nyomása: 6-8 bar

Földgáz térfogata: $0-1200 \text{ Nm}^3/\text{h}$

- Ionos kompresszor: A Linde saját fejlesztésű ionos kompresszora a hidrogén-kondicionálás központi eleme. Egy „ionos folyadék” (folyékony só) keni, hűti és tömíti a hidraulikus hajtású dugattyús kompresszort anélkül, hogy bármilyen szennyeződést adna a hidrogénhez. Az egységet többváltozós működésre tervezték, beleértve a gyors terhelésváltást és a nagy hatékonyságot részterhelésnél. [37]

Maximális térfogat: $1250 \text{ Nm}^3/\text{h}$ / 112 kg/h

Minimális szívónyomás: 15 bar

Maximális nyomás: 250 bar

Maximális energiafogyasztás: 350 kW

Terhelési tartomány: 10-100 %

- Teherautó/kamion feltöltése: Itt a hidrogént teljesen automatizált eljárással pótkocsikba töltik. Miután a töltőtömlőt csatlakoztatták a teherautóhoz, elemzik a maradék tartalmát. Ezután a pótkocsit megtöltik a kompresszorból származó hidrogénnel. A tisztaságot, a hőmérsékletet és a nyomást folyamatosan ellenőrzik. A

töltési folyamat befejezése után a töltőtömlőt levásztják, és kinyomtatják az átviteli dokumentumokat. A teherautó készen áll a hidrogén felvételére és szállítására üzemanyagtöltő állomásokhoz vagy ipari fogyasztókhoz. [37]

Pótkocsi üzemi nyomása: 200 bar

Tárolási kapacitás: 300-600 kg

Töltési idő: körülbelül 3 óra



9.1. ábra. Hidrogéntermelés folyamata, hidrogéntárolás és hidrogénszállítás [38]

Ahogy az ábra is mutatja a szélerőmű segítségével történik az elektrolízis. A folyamat végén nyert hidrogént több céllal is fel lehet használni: közlekedés, fűtési rendszerek vagy erőművek támogatására.

A víz elektrolízise jelenleg a legpraktikusabb eljárás megújuló erőforrások felhasználásával. A rendszer központi berendezése pedig az elektrolizátor. A hagyományos elektrolizátorok rögzített hidrogéntermelési sebességgel működnek, stabil elektromos energiaviszonyok mellett. Az alkáli és protoncserélő membrán (PEM) elektrolizátorokat széles körben használják szélenergia/PV-hidrogén rendszerekben világszerte, mivel ez a két elektrolizáló típus stabilan tud működni szakaszos és ingadozó teljesítmény mellett.

Például a Kínai Állami Hajóépítő Társaság 718. Kutatóintézete (CSSC) által kifejlesztett $800 \text{ Nm}^3/\text{h}$ lúgos elektrolizátor több lúgos PEM sorozatból áll, amelyek különböző teljesítménytartományok szerint vannak csoportosítva. A különböző csatolási mechanizmusokon alapuló adaptív teljesítménytartomány-beállítással széles, 20–135%-os teljesítmény-beállítási tartományt tud elérni a teljes rendszerre vonatkozóan, javítva ezzel a megújuló energia konverziós arányát. [41]



9.2. ábra. $800 \text{ Nm}^3/\text{h}$ lúgos elektrolizátor, amelyet a Kínai Állami Hajóépítő Társaság 718. Kutatóintézete (CSSC) fejlesztett ki. [41]

9.3. Hidrogén tárolása

A hidrogén előállítás költségei nem tartalmazzák a végfelhasználóhoz való szállítás költségét. Jelenleg a szállítási és tárolási költségek nem jelentenek jelentős problémát, mivel a hidrogén 85 százalékát a helyszínen állítják elő és fogyasztják el. Ha azonban a hidrogént nem a felhasználás helyén állítják elő, akkor a szállítási és tárolási költségek emelkedni fognak.

Nagy mennyiségű hidrogén hónapokig tartó tárolása esetén a geológiai adottságok biztosítják a legalacsonyabb költséggel a tárolást. Négy konkrét geológiai lehetőség: sóbarlangok, kimerült olaj- és gázmezők, víztartó rétegek és sziklabarlangok. A sóbarlangok a legoptimálisabbak a hidrogén tárolására. A sóbarlangos tárolás elsődleges előnyei a hatékonysága (a befecskendezett hidrogénnek csak egy kis része nem nyerhető ki), a szennyeződések hiánya és a magas üzemi nyomás – ami lehetővé teszi a gyors kisülést, amikor hidrogénre van szükség. Texasban a Chevron Philips Clemens terminál az 1980-as évek óta tárolja a hidrogént egy sóbarlangban. Nemrég Texasban az Air Liquide üzembe helyezte a világ legnagyobb hidrogéntárolóját, amely egy SMR-gyár 30 napos termelését képes tárolni. [39]

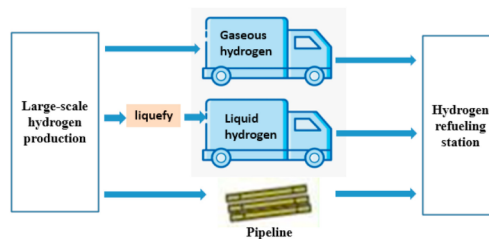
A másik három lehetőség a kimerült tározók, víztartó rétegek és sziklabarlangok. A sóbarlangokhoz képest ezeknek az opcióknak a hátrányai közé tartozik a több áteresztő képződmény (amely csökkenti a hatékonyságot és az üzemi nyomást), a nagyobb szennyeződések (amelyek költséges eltávolítást igényelhetnek hidrogénkibocsátáskor), valamint a hidrogén reaktivitása a kőzetekkel, folyadékokkal és mikroorganizmusokkal (ami csökkenti a hatékonyságot és szennyeződést okoznak).

A sóbarlangokban történő tárolás optimális, amennyiben azok földrajzilag elérhetőek. A kimerült olaj- és gáztározók és víztartó rétegek műszakilag megvalósíthatók, de magasabb beruházási és üzemeltetési költségekkel járnak. A sziklabarlangok műszakilag bizonytalanabbak, de potenciálisan alacsonyabbak a beruházási és üzemeltetési költségek, mint a víztartó rétegek és a kimerült tározók esetén. [39]

9.4. Hidrogén szállítása

Nagy mennyiségű hidrogéngáz alacsony költséggel történő szállításához csővezetékekre, alternatív energiahordozókra való átalakításra vagy cseppfolyósításra van szükség. A tiszta hidrogén csővezetékes szállítása hidrogénvezetékek építését, esetleg meglévő, erre a célra már nem használt földgázvezetékek átalakítását igényli. A hidrogénnek nagyon kicsi a sűrűsége és a csöveken keresztül gyors az áramlása, majdnem háromszor gyorsabb, mint a földgázé. A hidrogéngáz csővezetékeken történő szállítása olyan költségekkel jár, amelyek szinte lineárisan skálázódnak a távolsággal. [39]

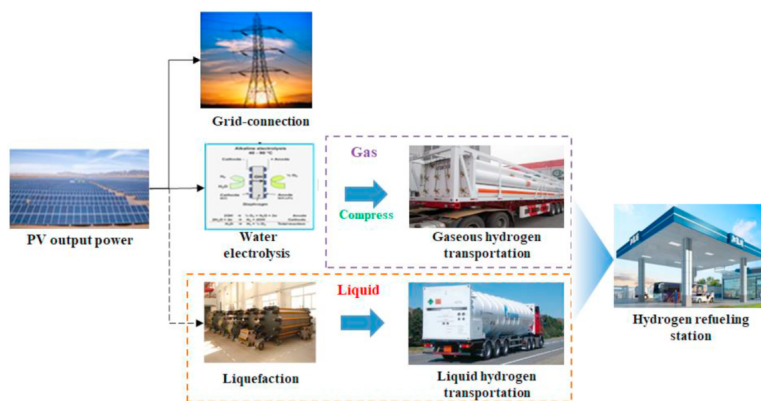
A hidrogénerőmű, nagyméretű PV erőművek általában a hidrogénenergia piactól távol eső területeken épülnek, így a hidrogént a hidrogén-töltőállomásokra kell szállítani (HRS). A nagyméretű hidrogéntermelő rendszerek hidrogénszállítási módjai közé tartozik a gáz-nemű hidrogén (GH_2) szállítása, a folyékony hidrogén (LH_2) szállítása és a csővezetékes szállítás, amint az a lenti ábrán látható. Ezek közül a nagynyomású GH_2 szállítási technológia viszonylag kiforrott. 2019 végére világszerte 432 hidrogénállomás üzemel, és ezek több mint 80%-a átvette a nagynyomású GH_2 tárolási módot. A GH_2 tárolási sűrűsége és szállítási hatékonysága azonban alacsony. Az LH_2 tárolási sűrűsége normál nyomáson $70,9 \text{ kg/m}^3$, ami a 70 MPa-nál mért GH_2 sűrűség 1,8-szorosának felel meg. Ezért az LH_2 hatékonyabb, és alkalmasabb nagyszabású, távolsági szállításra. Az LH_2 előállításának energiafogyasztása azonban magas és bizonyos tárolási és szállítási folyamat párolgási veszteséggel jár. [41]



9.3. ábra. A nagyüzemi hidrogéntermelő rendszerek hidrogénszállítási módjai. [41]

A GH_2 tárolási és szállítási módhoz a GH_2 közvetlenül a hidrogéntároló tartályba kerül, és a HRS-be kerül. Így a napelemes erőműben keletkező többlet villamos energiát elsősorban elektrolizátorok veszik fel hidrogén előállítására. Az LH_2 tárolási és szállítási módhoz a GH_2 -t hidrogén cseppfolyósítókkal folyékony hidrogénné kell alakítani. A hid-

rogén cseppfolyósításának nagy energiafelhasználása miatt a fotovoltaikus erőművi többlet villamos energiát elsősorban az elektrolizátorok és cseppfolyósítók abszorbeálják. A PV-hidrogén rendszer energia átcsoportosítása különböző hidrogéntárolási és szállítási módok között a következő ábrán látható. [41]



9.4. ábra. Teljesítmény átcsoportosítás a PV-hidrogén rendszerben. [41]

A fent tárgyalt hidrogéntárolási és -szállítási módszerek költségcsökkentése mellett két stratégia javasolt a költségek csökkentésére vagy az infrastruktúra kezdeti szükségleteinek csökkentésére: az egyik a hidrogén keverése földgázzal a meglévő földgáz-infrastruktúra hasznosítása érdekében, a másik a hidrogén-infrastruktúra fejlesztése korlátozott földrajzi körön belül.

Egy tanulmány optimalizálta a PV-hidrogén integrált rendszer teljesítmény-átcsoportosítását és kapacitáskonfigurációját.

A lépések összefoglalása a következő [41]:

1. Napi hálózati csatlakozási diszpécser modellt hoztak létre annak érdekében, hogy a nagyméretű PV erőművek megfeleljenek a távolsági energiaátviteli követelményeknek, amelyek három hálózati csatlakozási módot fed le.
2. A hidrogén termelés folyamatának és berendezési paramétereinek megfelelően, kidolgozásra kerültek a hidrogéntermelő rendszer működésszabályozási stratégiái, különböző tárolási és szállítási módok mellett.
3. A PV-hidrogén rendszer kapacitáskonfigurációjának meghatározására egy optimális kapacitás-konfigurációs modellt dolgoztak ki a hálózati csatlakozási módok, a hidro-

gén tárolási és szállítási módok, valamint a hidrogén szállítási távolságok figyelembevételével.

4. A 100 MW-os PV demonstrációs bázis mért inverter kimeneti adatai alapján éves hálózati csatlakozási eredményeket kaptak különböző hálózati csatlakozási módok mellett, és meghatározták az optimális PV-hidrogén rendszer kapacitás konfigurációkat.
5. Elemezték a hálózati csatlakozási módok, a hidrogén szállítási távolságok, valamint a hidrogén tárolási és szállítási módok rendszerre gyakorolt hatását.

A tanulmány következtetései a következők [41]:

- Az LH_2 tárolási és szállítási mód alkalmasabb távolsági szállításra.
- A hálózati csatlakozási mód és a hidrogén tárolási állapota befolyásolja a PV-hidrogén rendszer optimális teljesítményének valós elhelyezését.
- A hidrogén szállítási távolsága fontos szerepet játszik a PV-hidrogén rendszer kapacitásának optimalizálásában.
- Egy nagyméretű, hidrogén-rendszerrel integrált napelemes erőmű elősegítheti az energiafelhasználást és a kibocsátás csökkentését.

9.5. Hidrogén felhasználása a vas-acélgyártásban

A vas- és acélgyártás CO_2 kibocsátása a globális kibocsátás körülbelül 7 százaléka. Az ágazat két fő részből áll. Az elsődleges acélgyártásból, ahol a vasércet acéllá alakítják, valamint a másodlagos acélgyártásból, amelyben az acélhulladékot újra feldolgozzák. Az acélgyártás folyamattechnológiával tovább különíthető el. Az elsődleges termelés nagytöbbsége a nagyolvasztó-bázis oxigén kemence (BF-BOF) eljárás eredménye. Az elsődleges acélgyártáshoz sokkal kisebb mértékben járul hozzá a vas közvetlen redukciója (DRI), amelyet ezt követően elektromos ívkemencében (EAF) acéllá dolgoznak fel. Jelenleg az elsődleges acélgyártás DRI-EAF folyamatában használják a hidrogént, és ahol a dekarbonizált hidrogén potenciálisan hozzájárulhat a jövőben. Nevezetesen, a jelenlegi használat-

ban (és a javasolt jövőbeni tervekben) a hidrogén szerepe a vas redukálószer, nem pedig a termelési folyamatok fűtőforrása. [39]

A BF-BOF eljárás magában foglalja a vasérc átalakítását nagy széntartalmú nyersvas-sá, majd a nyersvas feldolgozását alacsony szén-dioxid-tartalmú acéllá. Szinter (tömörített vasérc), további vasérc, koks (magas széntartalmú szén, illékony vegyületektől megtisztítva) és mészkő kerül a nagyolvasztóba, ahol a vasérc szén-monoxiddal redukálva vasat és CO_2 -t termel. A kapott megolvadt nyersvas (gyakran acélhulladékkal kombinálva) egy BOF-ba kerül, ahol az oxigén reagál a nyersvasban lévő szén egy részével, így alacsony szén-dioxid-kibocsátású acélt és további CO_2 -t eredményez. A BF-BOF acélgyártási útvonal összes szén-dioxid-kibocsátása magas – átlagosan $1,73 \text{ tCO}_2 / \text{tonna acél}$ –, mivel a szinterezési, koksolási és nagyolvasztó eljárások mindegyike szénintenzív. [39]

A BF-BOF eljárás dekarbonizálását megkérdőjelezi a szén szerepe, amely hőt, szén-monoxidot és fizikai szerkezetet biztosít a nagyolvasztóban zajló reakcióhoz. Következésképpen a tüzelőanyag teljes átállása hidrogénre nem kivitelezhető, és a dekarbonizált hidrogén szerepe a felhasznált koks mennyiségének csökkentésére korlátozódna. Tekintettel az üzemanyag-váltás technikai korlátaira, a BF-BOF acélgyártásból származó kibocsátások csökkentésére irányuló erőfeszítések a CCUS-ra (szén-dioxid-leválasztás és -tárolás, illetve ennek hasznosítással kombinált változata) összpontosítottak. A BF-BOF acélgyártás három CCUS-módszere: egy oxigén-égetés és két utóégetési folyamat. A három módszer 47-60 százalékkal csökkenti a kibocsátást. [39]

DRI-EAF folyamat és hidrogénhasználat: A bevitt energia és a nyersanyag szén-dioxid-intenzitásának széles tartománya miatt a DRI-EAF útvonal CO_2 -kibocsátása változóknabb, mint a BF-BOF acélgyártásból származó kibocsátás. A DRI-termelés háromnegyedében földgázt használnak, a fennmaradó részt pedig a szén teszi ki. A szénelapú DRI gyártás során a szenet elgázosítják – ez a barna hidrogéntermelés első lépése –, hogy gázokat állítsanak elő a vasérc redukálásához. Az EAF szakaszban a kibocsátás az elfogyasztott villamos energia szén-dioxid-intenzitásától függ. A dekarbonizált hidrogén csökkentheti a DRI-EAF folyamatból származó kibocsátást azáltal, hogy helyettesíti a szén-monoxid és hidrogén keveréket – a földgáz reformálásából vagy a szénelgázosításból –, amelyet a vasérc csökkentésére használnak. [39]

A zöld hidrogén költséghatékonyabb felhasználásán túl, mint az energia- és ipari fűtő-

si ágazatokban, az acélgyártás nagy piacot kínál a dedikált hidrogén számára. Bizonyos beruházások megvalósíthatóak viszonylag kevés ráfordítással, mint például a tiszta H_2 keverése a DRI-eljárásba. A magas szén-dioxid-kibocsátású acélgyártó üzemek flottájáról az alacsony szén-dioxid-kibocsátású acélgyárakra való átállás során a dekarbonizált hidrogén megfelelő ármeghatározása kulcsfontosságúnak bizonyulhat. 2030 és 2050 között, mivel a szállított hidrogén tervezett költsége $1,50 \text{ USD/kgH}_2$ alá csökken, és az SCC 61 USD/tCO_2 -ról 84 USD/tCO_2 -ra emelkedik, a hidrogén rendkívül versenyképes lesz az acélgyártásban. [39]

9.6. Hidrogén keverése földgázzal

A hidrogén földgázzal való keverése azért vonzó, mert a mai kiterjedt földgáztároló és csővezeték-infrastruktúra lehetővé teheti a hidrogén fejlesztésének folytatását, mielőtt a dedikált hálózat kiépítésének tőkeköltései – és potenciálisan hosszadalmas időbeosztása – felmerülnének. A földgázzal keverhető hidrogén arányának vannak korlátai. Átlagosan 10-20 térfogatszázalék hidrogén érhető el az infrastruktúra módosítása nélkül, de az infrastruktúra-elemek hidrogéntűrőképessége nagyon eltérő lehet. A földgázhálózat egy olyan komponense, amely alacsony toleranciával rendelkezik a hidrogénnel szemben, korlátozhatja a hidrogénkeverést a hálózat egészében. A földgáz ipari fogyasztói, mind a nyersanyag, mind a tüzelőanyag tekintetében szűk előírásokkal rendelkezhetnek a gázkeverék tisztaságára vonatkozóan, így a hidrogénkeverés kevésbé lenne megfelelő ezekben a folyamatokban. Ezen túlmenően, mivel a hidrogénnek a földgázkeverékből való elválasztásának költsége túl magas, a földgázelegyítés a csővezetékes hasznosítás érdekében nem ésszerű, kivéve, ha a végső fogyasztó alkalmas a földgáz és hidrogén keverékére. Úgy tűnik, hogy az energiaszektor rugalmasabb a földgázkeverés terén, a közelmúltban olyan gázturbinákkal, amelyek kompatibilisek a hidrogén jelentős részével. Például a Mitsubishi Hitachi Power System (MHPS) modern gázturbinái 30 százalék hidrogént képesek felhasználni. [39]

Ha dedikált hidrogén-infrastruktúrát kell építeni, mert vagy túllépik a keverési határértékeket, vagy egyszerűen csak olcsóbb megoldásról van szó, a szállítási költségek minimalizálhatók, ha a hidrogéntermelést, keresletet és tárolást közel helyezik el. Az utahi Mitsubishi projekt sóbarlangokat használna a megtermelt hidrogén tárolására, amely

azután tüzelőanyagot biztosítana a közeli turbinák és üzemanyagcellák számára. Ha az energiaátvitel költsége alacsonyabb, mint a hidrogénszállítás költsége, akkor ez a típusú klaszter a zöld hidrogén modellje lehet az energiaszektorban. A kék hidrogén egy életképes rövid távú megoldás a szürke hidrogén helyettesítésére, felére csökkenti a hidrogéntermelés CO_2 -kibocsátási lábnyomát. Tekintettel a hidrogén-infrastruktúra költségére és korlátozott jelenlegi kiterjedésére, vagy a kék hidrogén kereskedelmi forgalomba hozatala egy meglévő klaszterben (pl. az Öböl-parti régióban), vagy a kék hidrogén helyszíni előállítás (pl. finomítóban vagy ammóniagyárban) lenne a leginkább megvalósítható rövidtávú opció. [39]

A CCUS technológia és infrastruktúra fejlesztése csökkentené a kék hidrogén tőke- és működési költségeit, és az SMR reaktorokról az ATR reaktorokra való átállás lehetővé tenné, hogy a 90 százalékos leválasztású kék hidrogén a legolcsóbb hidrogéntermelési módszer legyen (a szénköltségek figyelembevétele után) az új létesítményekben. A kibővített hidrogéntárolás és csővezetékek, valamint a csökkentett infrastrukturális költségek lehetővé tennék, hogy több telephelyen kívüli hidrogéntermelést biztosítsanak a végfelhasználók szélesebb körének ellátásához. Azonban a hidrogén néhány száz mérföldnél nagyobb távolságra történő szállításának magas költsége kedvez a hidrogénnek a termelési forráshoz viszonylag közel történő felhasználásának. [39]

Hosszabb távon, 2030-tól 2050-ig és azután a zöld hidrogén a leggazdaságosabb termelési eljárássá válhat. A jelenlegi tervezett és javasolt zöld hidrogénüzemek az iparág optimizmusára utalnak a technológiával kapcsolatban, és a megnövekedett léptékel az elektrolizátorok költségei gyorsan csökkenhetnek, amint azt a jelenlegi piackutatás is jelzi (Mathis és Thornhill 2019). Ezen túlmenően a szél- és napenergia további költségcsökkentése csökkentené a zöld hidrogén energiaköltségeit, és az időszakosan megújuló energiaforrások által dominált villamosenergia-hálózatban előfordulhat olyan alacsony ár, amelyet a hálózatra kapcsolt zöld hidrogén hasznosíthatna. A hosszabb távot természetesen nagyobb bizonytalanság jellemzi az áramárakban, a tőkeköltségekben és a jelentős technológiai változásokban, amelyek mind befolyásolhatják a dekarbonizált hidrogénellátás költséghatékonyságát. [39]

9.7. Hidrogénpark Magyarországon

Az idáig elemzett hidrogéntermelési, tárolási és szállítási módok alapján az alábbi hidrogénpark valósítható meg Magyarországon. A cél egy olyan park létrehozása ami majdnem 100%-osan megújuló energiával működik.



9.5. ábra. Magyarországi energiapark (projekt)

A hidrogénpark ellátását nagy részben a napenergia biztosítaná. Napos hónapokban amikor a napsütötte órák száma magas, akkor csak a naptól nyert energia biztosítaná az ellátást, abban az esetben viszont amikor a napenergia kevés, a szélenergia segítene be a folyamatos ellátásba. Az elektrolízátor a napenergia segítségével működne. Az elektrolízátorba szükséges vizet a csatornarendszerből kinyert szennyvíz biztosítaná. Mielőtt a víz bekerülne az elektrolízátorba, átmenne egy víztisztó berendezésen ami kinyerné a szennyvízben található összes szennyeződést és oldott ásványi anyagot. Abban az esetben, ha a vízellátás akadna, akkor a park területén található mesterséges tóból pótolható a szükséges víz mennyisége.

Az elektrolízátorok modern PEM-elektrolízis technológiát használnak. A parkban három üzemelne, egyenként akár 2 MW csúcsteljesítménnyel. A rendszer további lényeges

elemei közé tartozik a kétfokozatú ionkompresszor, a gáztáp, a töltőberendezések és a kapcsolóberendezés. A Linde által kifejlesztett „ionos kompresszor” a megtermelt hidrogént sűríti, így tárolótartályokba, gázcsövekbe és tartálykocsikba tölthető. Az itt megtermelt gázt tartálykocsikkal el lehet szállítani hidrogéntöltő állomásokra, egy másik alkalmazási területe a gáz földgázhálózatba keverése.

A hidrogén hosszútávú tárolása szempontjából a legoptimálisabb az lenne, ha a park területén lenne egy sóbarlang, mivel a befecskendezett hidrogénnek csak egy kis része nem nyerhető ki ezzel a tárolási technológiával. A leggyakoribb tárolási módszer a nyomástartó tartály. Ezekből a tartályokból később tartálykocsikba lehet tölteni a hidrogént. A hidrogén gáz tárolási nyomása 200 Bar, a cseppfolyós hidrogén tárolási nyomása 1 Bar.

A megtermelt hidrogén felhasználására több lehetőség is van, mint például a helyben felhasználás vagy az elszállítás. Figyelembe kell venni szállítás esetén, hogy ha túl nagy a távolság akkor nem éri meg gazdaságilag. Az egyik legjobb megoldás az lenne, ha a szállításához használt járművek is hidrogénenergiával működnének, így még környezetbarátabb lenne a folyamat. Maximum 100km az a távolság ami még megéri a szállítást.

A helyben felhasználást segítheti akár a park területén üzemeltetett töltőállomás. A töltőállomáson hidrogénautót és elektromos autót is lehetne tölteni. Környezetvédelem szempontjából és gazdaságilag is az egyik legjobb megoldás az lenne, ha a telepen közlekedő járművek csak ilyen típusúak lennének.

Szállítás további felhasználásra történhet vezetékhálózaton keresztül, közúton tartálykocsikkal, vasúti hálózaton vagy akár vízi úton. A vezetékhálózathoz egy nagyon jól kiépített rendszerre van szükség, ami mind időigényes és gazdaságilag is elég nagy beruházást vonna magával. A leggyakoribb szállítási módszer a közúti szállítás ami már egy jól kiépített közútrendszert használ. Végző felhasználó lehet az ipar, a földi közlekedés, vízi közlekedés és a légi közlekedés is. Tartálykocsikkal a hidrogén gyárakhoz is szállítható nem csak töltőállomásokra. A közúti közlekedés által kibocsátott károsanyag mennyiséget drasztikusan csökkenteni lehetne, ha nem csak a személyautók, de a teherautók és a tömegközlekedési járművek is hidrogén alapú technológiát használnának. A fuvarozás, áruszállítás is nagyban hozzájárul a rossz levegő minőségéhez, abban az esetben ha csak hidrogén technológián alapuló járműveket használnánk érezhetően megváltozna a levegő minősége.

A vízi közlekedésben is nagy előre lépést jelent a hidrogén technológiával működő járművek használata. Egészen a kicsi hajóktól a nagy óceánjárókig adott a lehetőség, hogy alkalmazzuk a hidrogént, mint üzemanyagot. A mostani üzemanyagok károsítják a természetet, ami akár egy-egy faj kihalását is okozhatják. A nagy óceánjárók üzemanyagellátását akár egy napenergiával működő rendszer is biztosíthatná. A hajók fedélzetére napelemeket lehetne telepíteni, ami működtetné az elektrolizátort. Az elektrolizátorhoz szükséges vizet az óceánból lehetne felszivattyúzni. A víz mielőtt az elektrolizátorba kerülne átfolyna egy tisztító berendezésen ami kinyerné a benne található összes szennyeződést és oldott ásványi anyagot. A megtermelt hidrogén lenne az üzemanyag, amit tulajdonképpen saját magát állítana elő a saját felhasználására.

A légi közlekedés nagyon sok káros anyagot bocsát ki. Első lépés lehetne, hogy a kisebb repülők hidrogén meghajtással közlekednének, így a kisebb repterek területén egy töltőállomás üzemelhetne. A végső cél az utasszállítók zöldesítése, hiszen naponta több ezer repülő száll fel.

A hidrogén használatát először kicsiben lehet elkezdeni, mint például hidrogén energiaparkok építése amik kiszolgálják a körülöttük lévő települések, városok szükségleteit. A végső cél, hogy minden jármű környezetbarát legyen és, hogy szinte megszűnjön a világ szén-dioxid kibocsátása amit a közlekedés, ipar bocsát ki.

Pozitív előre mutató magatartás, hogy az országok egyre jobban támogatják a megújuló energiát és annak felhasználásait. Ezt a trendet tovább kell vinni és egyre több támogatást, újítást kell létrehozni a környezetvédelem és a fenntartható fejlődés érdekében.

10. fejezet

Összegzés

A szakdolgozatomban a megújuló energiaforrásokkal megtermelt villamos energia, hidrogénenergetikai felhasználásával foglalkoztam. Részletesen megvizsgáltam a nap-, szélenergia villamos energia termelését. Kitekintettem az Európai hidrogénenergetikai megoldásokra. Mélyrehatóan megvizsgáltam a Power-to-Gas technológia működését, jellemzőit. Elmélyültem a tüzelőanyag-cellák típusaiban, felépítéseikben. Részletesen megvizsgáltam a hidrogéntermelési, hidrogéntárolási és hidrogénszállítási módokat.

A dolgozatomban végén egy olyan technológiával foglalkoztam, ami a napelemből álló rendszer és a PEM típusú tüzelőanyag-cella együttes alkalmazását használja. Ez a rendszer nem csak környezetvédelmi szempontból lehet megfelelő a jövőre tekintve, de gazdaságilag is előnyös lehet. A dolgozatomban végére egy teljes képet adtam a hidrogéntermelésről, hidrogéntárolás és hidrogénszállítási módokról. Ezen felül javaslatot tettem egy hidrogén energiapark felépítésére és működtetésére.

11. fejezet

Summary

In my dissertation I dealt with the use of electricity produced from renewable energy sources and hydrogen energy. I examined in detail the electricity production of solar and wind power plants. I looked at European hydrogen energy solutions. I thoroughly examined the operation and characteristics of the Power-to-Gas technology. I delved into the types and structures of fuel cells. I have examined in detail the modes of hydrogen production, hydrogen storage, and hydrogen transport.

At the end of my dissertation, I investigated a technology that uses a combined application of a solar system and a PEM-type fuel cell. This system may not only be environmentally sound for the future, but may also be economically beneficial. By the end of my dissertation, I presented a complete picture of hydrogen production, hydrogen storage, and hydrogen transport modes. In addition, I proposed the construction and operation of a hydrogen energy park.

Hivatkozások

- [1] URL: https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0021_Megujulo_energia/ch05.html.
- [2] URL: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Naper%C5%91m%C5%B1>.
- [3] URL: https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0021_Megujulo_energia/ch05s03.html.
- [4] URL: <https://nvsolar.hu/melyik-napelem-rendszert-valasszam/>.
- [5] URL: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Naph%C5%91er%C5%91m%C5%B1>.
- [6] URL: <https://wagnersolar.hu/napelemek-teljesitmenye-es-eves-termelese/>.
- [7] URL: <http://www.mekh.hu/eves-adatok>.
- [8] URL: <https://xforest.hu/szeleromu/>.
- [9] URL: <https://energiakaland.hu/energiavilag/energiaforras/szel>.
- [10] URL: <https://slideplayer.hu/slide/2090317/>.
- [11] URL: <https://hugas.met.com/hu/fyouture/zold-vilag/szelenergia-szeleromu/1152>.
- [12] URL: <https://www.portfolio.hu/gazdasag/20200809/kevesbe-fugg-magyarorszag-a-szomszed-oroszok-eromuveitol-de-igy-sem-teljesult-a-kormany-celja-443520>.
- [13] URL: http://www.mekh.hu/download/2/3f/e0000/Energiastatisztika_202101.pdf.
- [14] URL: http://www.mekh.hu/download/5/08/01000/Energiastatisztika_202107.pdf.

- [15] URL: http://www.mekh.hu/download/9/da/01000/Energiastatisztika_202109.pdf.
- [16] URL: <https://wattler.eu/2021/01/mi-tortent-a-napenergia-piacon-az-elmult-evekben/>.
- [17] URL: <https://www.portfolio.hu/gazdasag/20210319/alaposan-megrangattak-a-naperomuvek-a-magyar-villamosenergia-rendszert-474728>.
- [18] URL: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/hu/sheet/70/megujulo-energia>.
- [19] URL: <https://zoldbusz.hu/files/NE2030.pdf>.
- [20] URL: https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_31_hidrogen_es_metanol/ch01s02.html.
- [21] URL: <https://raketa.hu/indul-europa-legnagyobb-zoldhidrogen-beruhazasa>.
- [22] URL: <https://www.vezess.hu/hirek/2020/09/22/airbus-zeroe-projekt/>.
- [23] URL: <https://www.vezess.hu/haszongepjarmu/2020/07/19/itt-a-vizparat-pofogo-kukasauto/>.
- [24] URL: <https://www.vezess.hu/haszongepjarmu/2020/02/12/ez-lehet-a-vilag-legnagyobb-hidrogencellás-jarmuve/>.
- [25] URL: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Power-to-Gas>.
- [26] URL: <https://public.ek-cer.hu/~pressure/2hp2g/eloadasok/Torocsik.pdf>.
- [27] URL: https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0073_bevezetes_prokariotak_vilagaba/ch12.html.
- [28] URL: <https://docplayer.hu/4048570-A-tuzeloanyag-cella-mukodese-felepitesi-jellemzoi.html>.
- [29] URL: <https://docplayer.hu/4048570-A-tuzeloanyag-cella-mukodese-felepitesi-jellemzoi.html>.
- [30] URL: <https://www.kfki.hu/cheminfo/osztaly/kemia/tudnap11/inzelt1.pdf>.
- [31] URL: <http://www.energia.bme.hu/>.

- [32] URL: <https://sites.google.com/site/tuezeloanyagcella/a-tuezeloanyag-elemek-fajtai>.
- [33] URL: https://www.hfc-hungary.org/H2_Hirlevel_2018_1_aprilis.pdf.
- [34] URL: <https://www.energiepark-mainz.de/en/technology/technology/>.
- [35] URL: <https://www.energiepark-mainz.de/en/technology/product/>.
- [36] URL: <https://www.energiepark-mainz.de/en/energy/>.
- [37] URL: <https://www.energiepark-mainz.de/en/technology/technical-data/>.
- [38] URL: https://www.energiepark-mainz.de/fileadmin/user_upload/energiepark_layout/grafik_energiekreislauf.jpg.
- [39] URL: <https://www.rff.org/publications/reports/decarbonizing-hydrogen-us-power-and-industrial-sectors/>.
- [40] Dr. Horváth Gábor Dr. Tóth László. „Alternatív energia”. (2003).
- [41] „Optimal power reallocation of large-scale grid-connected photovoltaic power station integrated with hydrogen production”. *Journal of Cleaner Production* 298 (2021), 126830. old. ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126830>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621010490>.