

# SZÉLERŐMŰVEK ÁLTAL TERMELT VILLAMOS ENERGIA TÁROLÁSÁNAK LEHETSÉGES MÓDSZEREI

Készítette:  
KANDER DÁVID  
KÖRNYEZETTAN SZAK



PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM  
Fizikai Intézet  
Környezetfizika és Lézerspektroszkópia Tanszék  
Pécs, 2011. június

A jelen dolgozatot – annak teljes, valamint a hallgató védésen nyújtott teljesítményének ismeretében – megalapozottnak és elfogadhatónak tartjuk. A hallgató államvizsgára bocsátható.

A védés bizottság tagjai:

---

Bizottság elnöke

---

## Összefoglaló

**Kulcsszavak:** szélerőmű, energia, energiatárolás, tárolási módszerek

A megújuló energiaforrások kihasználtsága napjainkban egyre nagyobb teret hódít, azonban problémát jelent, hogy a szél csak szakaszosan, mondhatni „kedve szerint” áll rendelkezésünkre, ezzel zavarva az elektronikus hálózat stabilitását.

A szakdolgozatom célja, hogy e probléma kiküszöbölésére a különböző lehetséges tárolási módszereket bemutassam attól függően, hogy a tárolás mibenléte mechanikai energia, kémiai kötés vagy közvetlenül villamos energia formájában történik. E három csoportba számos energiatárolásra kifejlesztett technológia, módszer tartozik. Az energiatárolás lehetséges módszereit, mint műszaki, mint gazdasági tulajdonságaik alapján összehasonlítottam és rámutattam a legoptimálisabb lehetőségekre a hazai adottságokat is figyelembe véve.

A megfelelő számítások elvégzésével, a kapott értékek összehasonlítása után elmondható, hogy a hazai viszonyokat figyelembe véve két energiatárolási módszer lenne megfelelő a probléma kiküszöbölésére. A vizsgálatom során a két legoptimálisabb módszernek a szivattyús-tározós-erőmű illetve a hidrogénalapú üzemanyagcella bizonyult. E két technológia közül bármelyik alkalmazásával elérhető lenne, hogy a szélerőművek magasabb hatásfokkal álljanak rendelkezésünkre ezzel nagyobb szerepet vállalva az energiatermelésben.

# TARTALOMJEGYZÉK

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....	iv
ABSZTRAKT .....	v
TARTALOMJEGYZÉK .....	vi
TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE .....	v
ÁBRAJEGYZÉK .....	vi
KÉPJEGYZÉK .....	vii
1. BEVEZETÉS .....	1
2. CÉLKITŰZÉS .....	2
3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS .....	3
3.1. Energia és társadalom .....	3
3.1.1 Az energia fogyasztásának megoszlása a világátlag viszonyában .....	3
3.1.2 Az energia tárolásának szükségessége .....	4
3.1.3 Az energiatárolók néhány fajtája és jellemzésük melyek szélerőművekhez kapcsolódva számításba jöhetnek .....	5
3.2. Elektromos energia tárolása mechanikai energia formájában .....	6
3.2.1 Szivattyús-tározós erőművek .....	7
3.2.1.1. Szivattyús-tározós erőművek telepítésének előnyei és hátrányai .....	8
3.2.1.2. A szivattyús tározós erőművek lehetséges telephelyei Magyarországon .....	9
3.2.1.3. Szivattyús-tározós erőmű gazdaságos telepítésének ismérvei .....	10
3.2.2 Mechanikai energia tárolása sűrített gáz felhasználásával .....	10
3.2.3 Lendkerekes energiatárolás .....	12
3.3 Elektromos energia tárolása kémiai kötés formájában .....	16
3.3.1 Mesterségesen előállított tüzelőanyagok .....	20
3.3.2 Elektrokémiai akkumulátorok .....	23
3.3.3 Hidrogén, mint energiahordozó .....	24
3.3.3.1. A hidrogén előállítása .....	25
3.3.3.2. A hidrogén tárolása és szállítása .....	27
3.4 A metanol, mint az energiatárolás egyik lehetséges megoldása .....	29
3.5 Tüzelőanyag-cellák .....	30
3.5.1 Tüzelőanyag-cellák által felhasznált tüzelőanyagok .....	32
3.5.2. Direkt metanolos üzemanyagcella (Direct Methanol Fuel Cell – DMFC) .....	33
3.5.3. PEM (Proton Exchange Membran) cella, protonáteresztő membrános tüzelőanyag-cella .....	35
3.5.4. Egyéb tüzelőanyaggal működő cella .....	36
3.5.5. Tüzelőanyag-cellák nyomás illetve hőmérséklet értékei .....	37
3.6 Elektromos energia tárolása elektromos eszközökben - Szuperkapacitás .....	38
4. EREDMÉNYEK .....	39
5. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE, ANALÍZISE ÉS MEGVITATÁSA .....	40
6. ÖSSZEFOGLALÁS .....	41
IRODALOMJEGYZÉK .....	43

## TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

- 3.1. táblázat: Hagyományos akkumulátorok műszaki adatai
- 3.2. táblázat: Magas hőmérsékletű akkumulátorok műszaki adatai
- 3.3. táblázat: Energiahordozókhoz tartozó fajlagos energia értékek
- 3.4. táblázat: 100°C alatt üzemeltetett tüzelőanyag-cellák műszaki adatai
- 3.5. táblázat: 100°C-nál magasabb hőmérsékleten működő üzemanyagcellák műszaki adatai
- 4.1. táblázat: Az energiatároló módszerek műszaki adatai
- 5.1. táblázat: A mechanikai energia formájában tároló módszerek műszaki adatai
- 5.2. táblázat: Kémiai kötés formájában tároló módszerek és a szuperkapacitások műszaki

## ÁBRAJEGYZÉK

- 3.1. ábra: Az egy főre eső energiafelhasználás, a világtól viszonyában
- 3.2. ábra: Egy átlagos téli illetve nyári nap energia fogyasztása
- 3.3. ábra: Energiatárolás szakaszos üzemű energiaforrásoknál
- 3.4. ábra: Energiatárolás energiahordozóval
- 3.5. ábra: Szivattyús tározó erőmű elvi vázlata
- 3.6. ábra: A lendkerekes energiatarolás elvi vázlata
- 3.7. ábra: A lendkerékben tárolt energia leadása
- 3.8. ábra: Mesterséges tüzelőanyag előállítása és felhasználása
- 3.9. ábra: Ragone-diagramm
- 3.10. ábra: Víz elektrolízise
- 3.11. ábra: Cseppfolyós hidrogén előállításához szükséges kriosztát
- 3.12. ábra: Az adszorpciós berendezés szerkezeti vázlata
- 3.13. ábra: Egy tüzelőanyag-cellás energiaforrás elvi vázlata
- 3.14. ábra: Hidrogén/oxigén tüzelőanyag-elem egy cellája
- 3.15. ábra: Metanol molekula
- 3.16. ábra: Metanollal működő üzemanyagcella
- 3.17. ábra: PEM cella vázlata
- 3.18. ábra: Vanádium Redox Battery
- 5.1. ábra: Szivattyús-tározós-erőmű elvi vázlata
- 5.2. ábra: A mechanikai energia formájában tároló módszerek hatásfok értékeinek összehasonlítására szolgáló diagramm
- 5.3. ábra: Mechanikai energia formájában tároló módszerek fajlagos energiakapacitás értékeit összehasonlító diagramm
- 5.4. ábra: Mechanikai energia formájában tároló módszerek teljesítmény értékeit összehasonlító diagramm
- 5.4. ábra: Mechanikai energia formájában tároló módszerek által tárolt energia mennyiségének összehasonlítását ábrázoló diagramm
- 5.5. ábra: Kémiai kötés formájában tároló módszerek és szuperkapacitások eredő hatásfok értékeinek összehasonlítása
- 5.6. ábra: Az ólom- és lítium akkumulátorok illetve szuperkondenzátorok fajlagos energiakapacitás értékeinek összehasonlítására szolgáló diagramm
- 5.7. ábra: Kémiai kötés formájában tároló módszerek és szuperkapacitások teljesítmény értékeinek összehasonlítása
- 5.8. ábra: Kémiai kötésben történő energiatarolás mennyiségének összehasonlítása
- 5.9. ábra: Hidrogén, metanol és a hidrogénalapú tüzelőanyagcellák energiasűrűség értékeinek összehasonlítása
- 5.10. ábra: Ólom- és lítium akkumulátorok és szuperkapacitások energiasűrűség értékeinek összehasonlítása

## KÉPJEGYZÉK

- 3.1. kép: Szivattyús-tározós-erőmű Goldistahl, Németország
- 3.2. kép: Francis-szivattyú-turbina
- 3.3. kép: Prédikálószerk és környékének helyszínrajza
- 3.4. kép: Energiatarolás sűrített levegő formájában
- 3.5. kép: Lendkerekes energiatarolás
- 3.6. kép: Szélerőmű által termelt villamos energia tárolására alkalmas akkumulátor
- 3.7. kép: Energiatarolás sorba kapcsolt akkumulátorokban
- 3.8. kép: Üzemanyagcella
- 3.9. kép: Szuperkapacitás

# 1. BEVEZETÉS

Napjainkban az energiáról, mint létszükségleti tényezőről beszélhetünk. A kőolaj, földgáz és kőszénkészletek rohamléptekben csökkenő mennyisége illetve kitermelésük nehézségei miatt új technológiák kifejlesztésére került sor. E területen történő kutatások és a környezetvédelem folyamatos előtérbe kerülésének eredményeként egyre nagyobb teret hódítanak a szelet, mint megújuló energiát hasznosító szélerőművek. Magyarországnak 2004. május. 1.-én való Európai Unióhoz való csatlakozásával számos elvárásnak és célkitűzésnek kell megfelelnie, többek között annak is, hogy 2020-ra az összes energiafogyasztás 25%-át megújuló energiából finanszírozza. Problémát jelent azonban, hogy a szél csak szakaszosan áll rendelkezésünkre. A nehézség kiküszöbölésére az energia tárolására volna szükség, ezzel biztosítva a folyamatos rendelkezésre állást, a villamos energia hálózat stabilitását és ugyanakkor a gazdaságosabb energiafelhasználást. Ma már a technológia fejlődésével és a kutatások eredményeként az energia tárolására számtalan módszer létezik. Hazánkban azonban számos országgal ellentétben még nem megoldott az energia nagyobb mennyiségű tárolása.

## 2. CÉLKITŰZÉS

Szakedolgozatom célja, hogy:

- megismerkedjem a szélerőművek által termelt energia tárolásának lehetséges módszereivel
- ismertessem ezeknek a technológiáknak a szükségességét
- összehasonlítsam egymással a rendelkezésre álló metódusokat
- a hazai viszonyokat figyelembe véve rámutassak a szélerőművek által termelt elektromos energia tárolásának legmegfelelőbb módszerére.

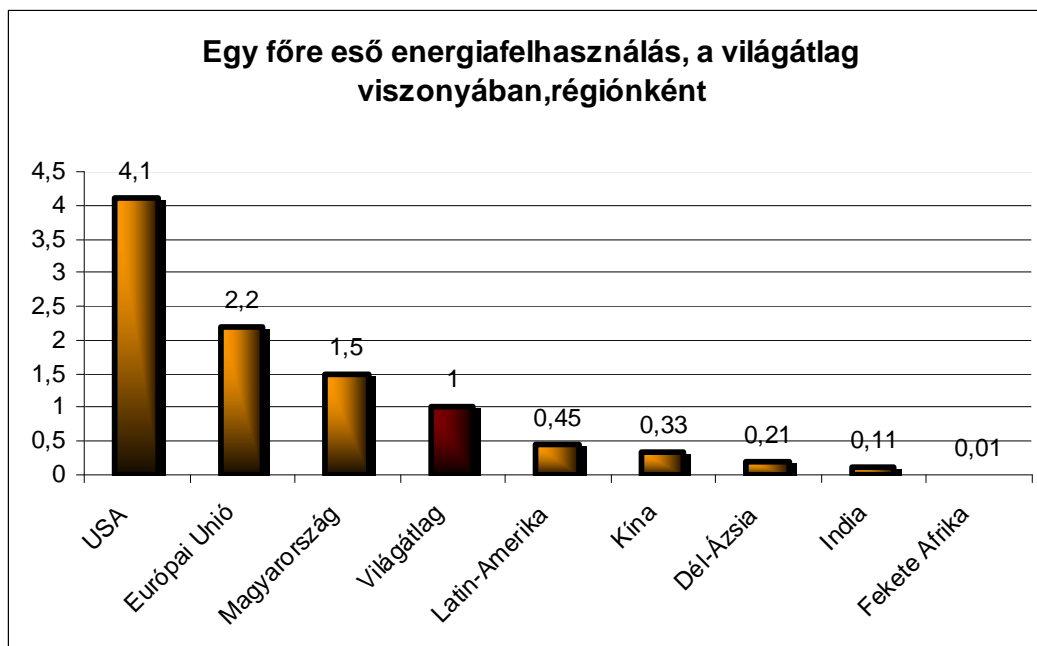
## 3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

### 3.1 Energia és társadalom

A ma élő ember mindennapjaiban elhanyagolhatatlanná vált az energiafelhasználás. Elegendő, ha csak a közlekedésre, munkavégzésre vagy csak szimplán az otthoni tevékenységeinkre gondolunk, ezekhez mind energia szükséges. Az energia elengedhetetlen feltétele egy civilizált társadalom létehez ugyanis minél fejlettebb társadalomról beszélünk annál nagyobb az energiaszükséglete (Vajda).

#### 3.1.1 Az energia fogyasztásának megoszlása a világszerte viszonyában

Nagy problémát jelent a világ energiafelhasználásának egyenlőtlen eloszlása, melyet a következő 3.1. diagram szemléltet a világszerte viszonyítva (Vajda):

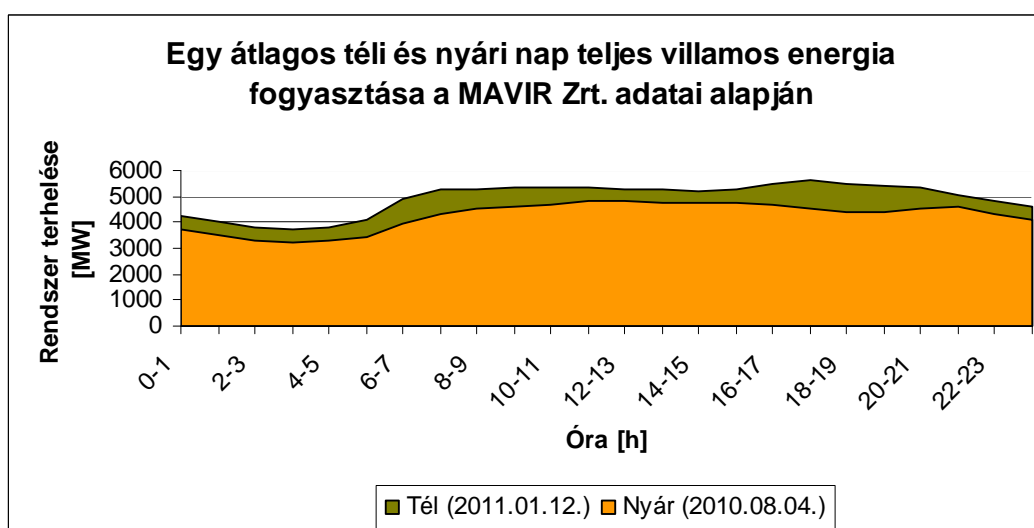


3.1. ábra. Az egy főre eső energiafelhasználás, a világotlag viszonyában (Vajda)

A világotlaltól balra a világ fejlett területei, jobbra a fejlődő régiói helyezkednek el. Ahogy a diagramm is szemlélteti Magyarország egy főre eső energiafelhasználása másfélszerese a világotlagnak. A Föld lakosságának egyötöd része a fejlett országokban él, ezen országokra jut az összes felhasználás kétharmada. Az elkövetkezendő évtizedek demográfiai viszonyai az energiafelhasználás jelentős megnövekedésével fog járni. Ez a megnövekedés jelentős környezeti ártalmakat fog indukálni (Vajda).

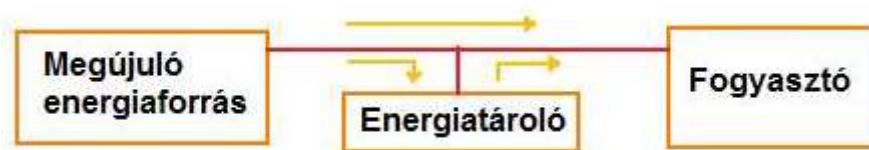
### 3.1.2 Az energia tárolásának szükségessége

A hazai illetve más országok villamos energia rendszerének egyik legnagyobb problémája, hogy az éjszakai időszakban nincs akkora igény, a folyamatos üzemre tervezett alaperőművek illetve a szél-erőművek által termelt energiára. Nem kevés gondot okoz úgyszintén a napi energiacsúcsok kielégítése. Egy átlagos téli nap villamos energia fogyasztását szemlélteti a következő diagramm a nap 24 órájára lebontva a MAVIR Zrt. (Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság) adatai alapján (3.2.ábra):



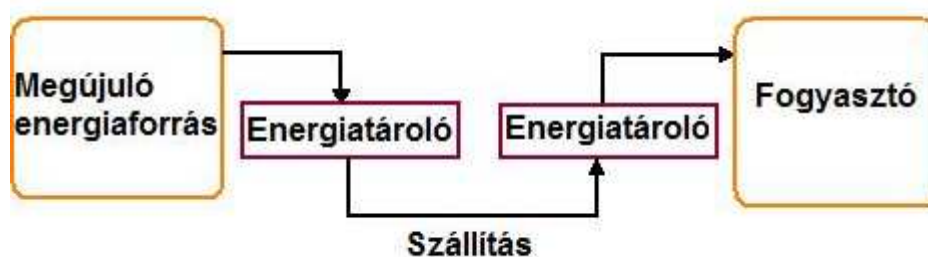
3.2. ábra. Egy átlagos téli illetve nyári nap energia fogyasztása (www.mavir.hu)

A szél-erőművek által termelt energiának a legelőnytelenebb tulajdonsága, hogy sajnálatos módon csak szakaszosan áll rendelkezésre, ez az időszakosság a hálózat stabilitását is megzavarja illetőleg csak 25-30%-os hatásfokkal áll rendelkezésre. Ezeknek a hátrányoknak a kiküszöbölésére, különböző az energia tárolására alkalmas technológia, eljárás áll rendelkezésre. Az energia tárolása lehetővé tenné a szélenergia nagyobb fokú, illetve gazdaságosabb, megszakítások nélküli felhasználását. Pufferként szolgálna az áramszolgáltató és a szél-erőműparkok között, felfogná, és egyben kiegyenlítené a lökésszerű terheléseket. Ezek a lökésszerű terhelések annál kisebbek minél nagyobb teljesítménnyel rendelkezik az adott szél-erőműparkunk. Ilyen tárolásra alkalmas erőművek telepítésével lehetővé válna, hogy a szélenergia versenyképes energiaforrássá váljon az alap- és csúcserőművekkel szemben, illetve lehetőség nyílna a szél által termelt energia egyenletes szállítására ([www.energiaporta.hu](http://www.energiaporta.hu)). Mindezek mellett ezzel az eljárással megnövelhető a megújuló természetes energiaforrások kihasználtságának határfoka. Az energia tárolására számtalan lehetőség kínálkozik azonban nem utolsó szempont, hogy melyik megoldás milyen környezetvédelmi, anyagi vonzattal jár. Az erőművek terheléskiegyenlítésére melyek szakaszosan rendelkezésre álló megújuló energiaforrásokat hasznosítanak akkumulátorokat, alkalmaznak. Amennyiben a szél fúj, azaz az erőmű képes energiatermelésre, a termelt energiát leadja az energiátárolónak, ugyanakkor mikor szélcsend van, azaz az erőmű üzemén kívül van az energiát a fogyasztónak az akkumulátor, adja le. Ez a módszer azonban csak helyi, átmeneti problémákat lát el. Ezt a folyamatot szemlélteti a következő 3.3. ábra (Tóth):



3.3. ábra Energiatárolás szakaszos üzemű energiaforrásoknál (Tóth)

Nagy távolságok esetén a termelt energia tárolására más módszereket alkalmaznak, amelyeknél a megújuló energiaforrást helyileg jó energiátárolási képességgel rendelkező mesterséges energiahordozót állítanak elő. Ezek a mesterséges energiahordozók energia tárolására alkalmas anyagok melyek az előállítás helyszínétől nagy távolságokra, a felhasználás helyére szállíthatók. Ezt láthatjuk a következő 3.4. ábrán:



3.4. ábra. Energiatárolás energiahordozóval (Tóth)

A különböző energiátárolókat jellemzőik alapján hasonlíthatjuk össze:

- Az energiátároló térfogategységre vagy tömegegységre vonatkoztatott fajlagos energiátároló képessége
- A tárolás és szállítás során kialakult veszteség
- Műszaki követelmények: biztonság, kezelés, karbantartási igény (Sembery).

### 3.1.3 Az energiatárolók néhány fajtája és jellemzésük melyek szélerőművekhez kapcsolódva számításba jöhetnek:

1. Elektromos energia tárolása mechanikai energia formájában - mechanikai akkumulátorok:
  - Helyzeti energia formájában történő tárolás szivattyús-tározós erőművel
  - Mechanikai energia tárolása sűrített gázzal
  - Lendkerekes energiatárolás
2. Villamos és elektromágneses energiatárolók
3. Elektrokémiai akkumulátorok
4. Kémiai energiatárolók és energiahordozók

### 3.2 Elektromos energia tárolása mechanikai energia formájában:

A mechanikai energia helyzeti vagy mozgási energia formájában található. A helyzeti energiát a Föld gravitációs terében vagy szilárd test rugalmas alakváltozásával tárolhatjuk. A mozgási energia tárolására legelterjedtebben a lendkerék forgási energiáját használják. A helyzeti energia tárolására, talán a legfontosabb példa a szivattyús-tározós erőmű. Ezeknek az erőműveknek a működési elve, hogy energiaminimumok idején a szélerőmű által termelt energiát a szivattyú működtetésére használják, mellyel vizet szivattyúznak az alacsonyabban fekvő víztározóból a magasabban elhelyezkedő víztározóba, majd csúcsfogyasztás idején ezt a felszivattyúzott vízmennyiséget visszaengedik a turbinára villamos energiatermelés céljából.

#### 3.2.1 Szivattyús-tározós erőművek



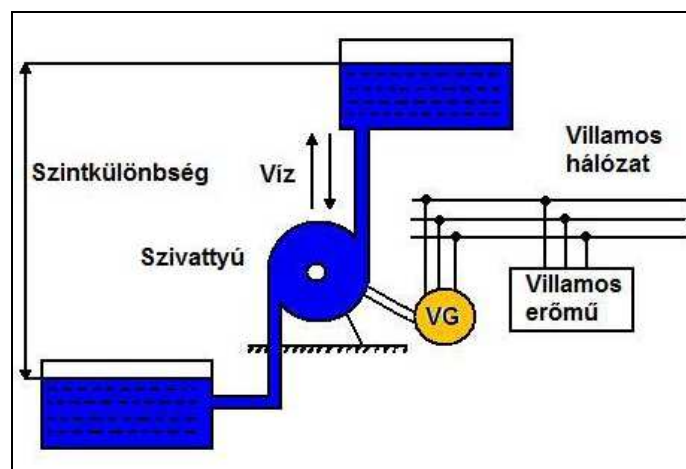
3.1. kép. Szivattyús-tározós-erőmű Goldistahl, Németország (www.hydroprojekt.de)

A szivattyús energiatározók 3 fajtáját különböztetjük meg:

1. A tiszta szivattyús energiatározót, amely energiát nem termel, csak tárol és átalakít.
2. A vegyes üzemeltetésű szivattyús energiatározót, amelyre jellemző, hogy nem csupán szivattyúzás révén tárol vizet, hanem a tározóhoz tartozó vízgyűjtő területről gravitációsan is. Ez növeli a szivattyúzásból származó energiamennyiséget és ez a típus gazdaságosabb, is mint az előbb említett ugyanis a gravitációs vízmennyiségből származó energiamennyiséget csak az egyszeres energiaátalakításból származó veszteségek terhelik.
3. A vegyes rendeltetésű szivattyús energiatározók a hidraulikus energiatároláson kívül más célokra is szivattyúznak vizet, például öntözés céljából.

Ezeknek a hidraulikus energiatárolóknak a használata csúcsterhelések időszakában előnyös. Egyik legnagyobb előnyeként említhető, hogy üzemkészsége rendkívül gyors. A teljes üzemkész állapotát körülbelül 2-10 perc alatt éri el. Összehasonlításként megemlíthető, hogy a csúcsenergia-igény kielégíthető hőerőművekkel azonban ezek költsége 30-40% -kal magasabb illetve a teljes üzembe állás ideje is jóval meghaladja a hidraulikus energiahordozókét, körülbelül 100-140 perc.

Szivattyús-tározós erőművek esetén az energia a víz helyzeti energiájában tárolódik, a vízelelés illetve a turbinán történő átvezetés miatt az erőmű hozzávetőlegesen 70-75% eredő hatásfokkal rendelkezik. A hidraulikus energiatároló turbógenerátorai két irányban működnek, ezt a villamos gépet a vázlaton egy VG rövidítéssel láthatjuk. Energiaminimumok idején, éjszaka munkagépként üzemelnek, amikor is villamos energia felhasználásával felszivattyúzzák a vizet a magasabban fekvő tározóba, ilyenkor a 3.5. ábrán feltüntetett VG jelzésű villamos gép motorként üzemel. Csúcsterhelés időszakában, a nappali órákban, a tározóból lefolyó vízmennyiség hajtja meg a VG jelzésű hidrogenerátort, mely villamos áramot termel.



3.5. ábra. Szivattyús tározó erőmű elvi vázlata

A szivattyú-turbinát melyet mindkét üzemre hasznosíthatjuk 1930-ban, fejlesztették ki. A hidraulikus erőművek megvalósíthatók két különálló gépcsoporttal is, melyből az egyik a szivattyú-motor, a másik a turbina-generátor egység. A megfelelő szintkülönbség eléréséhez leginkább a felszíni adottságokat használják ki, de nem ritka, hogy az alacsonyabban fekvő tározót a földfelszín alá telepítik, esetenként mesterséges gátakat hoznak létre. Ezek a tározós erőművek nagy teljesítményingadozások kiegyenlítésére alkalmasak. A tárolt energia mindaddig rendelkezésre áll, míg a fent elhelyezkedő tározó ki nem ürül. Az energia visszanyerésének az ideje ettől függően lehet néhány órány vagy néhány napos. Régi múltba tekint vissza a víz helyzeti potenciálkülönbségében rejlő energia tárolása. Először a világon az USA-ban telepítettek ilyen erőművet a Rocky folyón melynek teljesítménye 24,5 MW.

Ezeknek a tározós erőműveknek az elhelyezkedése különböző lehet, beszélhetünk a föld alatt elhelyezett gépház és a felszín felett elhelyezett gépház szivattyús-tározós erőművekről. Az ilyen erőművek esetén a legfontosabb kérdés, mind műszaki, mind gazdaságossági szempontból, hogy milyen hatásfokú, mennyire biztonságos az alkalmazott szivattyú és/vagy turbina, illetve a reverzibilis szivattyú-turbina. Ilyen szivattyú-turbinát szemléltet a következő 3.2. képen látható Francis-szivattyú-turbina:





3.2. kép. Francis-szivattyú-turbina  
([www.wikipedia.hu](http://www.wikipedia.hu))

### 3.2.1.1. Szivattyús-tározós erőművek telepítésének előnyei és hátrányai:

#### Előnyök:

- A hálózat igényeinek megfelelően rövid idő alatt (néhány perc) nagy teljesítmény felvételére illetve leadására képes
- Feszültség és frekvenciaszabályozásra kiválóan alkalmazható
- Széles körben elterjedt technológia
- Teljes egészében kidolgozott eljárás
- Meddő teljesítménytermelésre alkalmas
- Energiatárolásra alkalmas
- Széles teljesítmény és energia spektrum
- Az energiarendszerben üzemzavari tartalékkal bír
- A rendszer üzemeltetését gazdaságosabbá teszi
- Munkahelyet biztosít
- A megújuló energia előtérbe kerülésével igen kedvező együttműködés válik lehetővé
- A tárolási idő nem korlátozott
- Az eljárás 70-80%-os eredő hatásfokkal bír.

#### Hátrányok:

- A környezetre gyakorolt hatások jelentősek
- Telepítéséhez speciális adottságú nagy terület szükséges
- Magas költségigény jellemzi, csupán a hatalmas 1000-2000 MW-os teljesítménytartomány esetén szoríthatók a költségek 190000Ft/kW alá ([www.vet.bme.hu](http://www.vet.bme.hu))

### 3.2.1.2. A szivattyús tározós erőművek lehetséges telephelyei Magyarországon:

Ez a tárolási eljárás meglehetősen kedvező feltételeket, szabályozási lehetőségeket biztosít a villamos energia rendszerek számára. A magyar energiarendszer esetében szükséges illetve hasznos volna egy ilyen tározós erőmű telepítése mind a csúcsterhelések esetén hálózatra rásegítésként mind a szélerőművekre vonatkoztatva. Magyarországon már különböző méréseket folytattak, lehetséges telephelyek felkutatására ezek közül részletesebb vizsgálatokat végeztek a Duna-kanyarban, a Zempléni- illetve a Keszthelyi-hegységben. Legalkalmasabb területi

feltételekkel a Duna-kanyarban található Prédikálószték nevű hegycsúcstól 400 m távolságban elhelyezkedő terület rendelkezik. Két egymással összeköthető, egyenként 1,4 millió m<sup>3</sup> térfogatú medence helyezkedik el mely alkalmas, lenne felső, illetve alsó víztározónak. Természeti feltételekhez alkalmazkodva és kihasználva azokat a két tározóból egy 2700 m hosszú, 4,8 m átmérőjű, 22% átlagos eséssel bíró nyomásalagút vezetne a hegy lábáig, majd három irányba válna szét és elvezetne a Dömös községtől 500 m-re, a Duna partjától 260 m-re elhelyezkedő erőműhöz. Melyben hat gépcsoport üzemel. A gépcsoportok Francis-turbinából, alatta kétlépcsős szivattyúból, felette motorgenerátor működésű villamos gépből állnak. A teljes víznyelése az erőműnek 138 m<sup>3</sup>/s, a vízszállítás szivattyúüzemben 78 m<sup>3</sup>/s. A vizet alvízcsatornán keresztül vezetnék az erőműhöz és a Dunába, a maximális vízsebesség kb. 0,55 m/s. A következő képszemlélteti Prédikálószték és környékének helyszínrajzát.



3.3. kép. Prédikálószték és környékének helyszínrajza  
(www.sturovo.com)

### 3.2.1.3. Szivattyús-tározós erőmű gazdaságos telepítésének ismérvei:

A V térfogattal rendelkező tározómedence egyszeri leeresztésével fejleszthető villamos energia nagysága:

$$E_1 = \frac{\rho g V H_s}{3600} \eta_{cső} \eta_T \eta_G \eta_{Tr} \quad [\text{kWh}]$$

$H_s$  → a medencetér súlypontmagassága [m]

$g$  → nehézségi gyorsulás [ $\text{m/s}^2$ ]

$\rho$  → sűrűség [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\eta$  → hatásfok

A tározó üzemére jellemző érték az éves feltöltések és leürítések száma „f” melynek nagysága napi tárolásnál 150~300, heti tárolásnál 45~100 és éves tárolás esetén 1~2. A szivattyús-tározós erőművek gazdaságosságának a feltétele, hogy a beruházásnak a költségei „a<sub>t</sub>” fajlagos beruházási költségekkel számolva, plusz a szivattyúzásnak a költségei „e” átlagos villamos

energia költségeivel számolva ne haladják meg az  $E_{\Sigma}$  évi teljes energiaszolgáltatás költségeit „v” fajlagos költséggel  $P_{\max}$  teljesítményszolgáltatás mellett „a” fajlagos költség mellett az erőműből:

$$A_t + E_1 + eE_{\Sigma} / \eta < aP_{\max} + vE_{\Sigma}$$

$$a_t < f (a/h_{\text{évi}} + v - e/\eta)$$

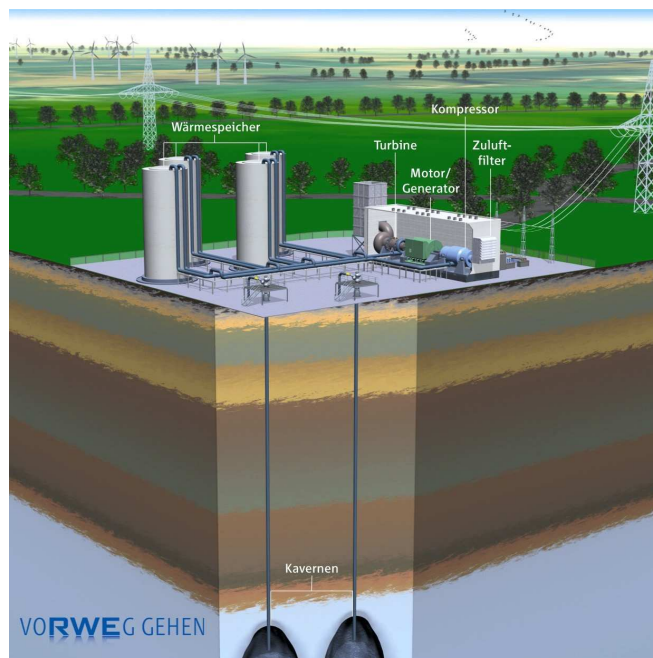
Ahol  $h_{\text{évi}}$  az éves kihasználási óraszám,  $\eta$  pedig a szivattyúzással és leeresztéssel nyerhető villamos energia előállításának eredő hatásfoka:

$$\eta = \eta_{\text{feltöltött}} \eta_{\text{leeresztett}} = (\eta_{\text{Tr}} \eta_{\text{motor}} \eta_{\text{szivattyú}} \eta_{\text{cs1}}) (\eta_{\text{cs2}} \eta_{\text{T}} \eta_{\text{G}} \eta_{\text{Tr}})$$

Korszerű, nagyteljesítményű tározóerőművek esetén  $\eta \sim 65-75\%$ . A napi kiegyenlítést szolgáló tározós erőművek esetén a legolcsóbb az áramköltség.

(Reményi, Hunyár)

### 3.2.2 Mechanikai energia tárolása sűrített gáz felhasználásával:



3.4. kép. Energiatárolás sűrített levegő formájában  
([www.kraftwerkforschung.info](http://www.kraftwerkforschung.info))

<http://www.kraftwerkforschung.info/energiesystem/druckluftspeicher-sucht-standort/>

A mechanikai energia tárolására a sűrített gáz is alkalmas, mely levegő vagy más gáz halmazállapotú energiahordozó lehet. Ezzel az eljárással a megújuló energiaforrások szakaszossága úgyszintén megoldható, úgy, hogy a sűrített levegővel vagy valamilyen gázzal gázturbinát üzemeltetnek, amely meghajtja a villamos generátort ez által fejlesztve villamos energiát. Ennek a sűrített levegőnek a nyomása meg kell, hogy haladja az 50-100 bar értéket. A sűrített levegő tárolására kétféle lehetőség kínálkozik. Kis mennyiségben a sűrített levegőt tartályokban tárolják, ezt a tárolási lehetőséget hasznosítják általában a szélerőműfarmok esetén. Nagy mennyiségű sűrített levegő tárolására bányák üregeit használják ki tárolás céljából.

Egy  $g$  tömegű sűrített gázból nyerhető  $w_{\max}$  maximális energiát a következő képlet segítségével számíthatjuk ki:

$$w_{\max} = RT/M$$

- R az egyetemes gázállandó, értéke 8,314 [J/mol K]
- M a gáz moláris tömege [g/mol]
- T a Kelvinben meghatározott gáz hőmérséklete

Minél kisebb a gáz moláris tömege, annál nagyobb a kinyerhető fajlagos energiája. Hidrogén esetén ez az érték  $M = 2$ , így a kinyerhető energia szobahőmérsékleten 1247 kJ/kg, ami 0,346 kWh/kg-nak felel meg (Reményi, Sembery).

A sűrített gázban rejlő energiátárolás előnyei:

- Teljes egészében kidolgozott és alkalmazásra kész technológia
- Széles energia és teljesítmény spektrum jellemzi
- Tárolási idő nem korlátozott
- Az eredő hatásfok 85% körüli értéket vehet fel

Hátrányai:

- Viszonylag hosszú kialakítási időre van szükség e technológia esetén
- Úgyszintén nagy tökeigény jellemzi ezt a technológiát, is mint az előzőeket kb. 76000Ft/kW ([www.vet.bme.hu](http://www.vet.bme.hu)).

### 3.2.3 Lendkerekkes energiátárolás



3.5. kép. Lendkerekkes energiátárolás  
([wohnen.pege.org.html](http://wohnen.pege.org.html))

A mozgási energia tárolásának egyik elterjedt formája, melyet úgy képzelhetünk el, mint egy igen nagy fordulatszámmal forgó tömeget.

A mozgási energia ilyen formában történő tárolását a következő egyenlettel írhatjuk le:

$$W = \Theta \omega^2 / 2$$



$\Theta \rightarrow$  Tehetetlenségi nyomaték [kg m<sup>2</sup>]

$\omega \rightarrow$  Szögsebesség [1/s]

A fordulatszám növelésének csupán az anyagi minőség szab határt. Minden anyagra jellemző egy maximális fordulatszám és maximális fajlagos energia, amelyet a szakítószilárdsága szab meg. Az acél illetve üvegszálalás műanyagból előállított lendkerekek képesek a legnagyobb fajlagos energia tárolására, ennek értéke a 10000 kJ/kg értéket is elérheti, amely hozzávetőlegesen 2,8 kWh/kg-nak felel meg. Ez a nagyságrend már összevethető a fosszilis energiahordozók által tárolt fajlagos energiával. A mozgási energia tárolásának a hátránya, hogy tárolása egyes esetekben nagy veszteségek árán lehetséges. Ezen eljárás során ezek az okok a csapágy súrlódásából illetve a légellenállásból adódnak. Azonban ezeknek a veszteségi tényezők kiküszöbölésére, napjainkban már a lendkereket vákuumban forgatják, illetve a hagyományos csapágyak helyett elektromágneses lebegtetésű csapágyakat alkalmaznak. A lendkeres energiátárolás előnyei közé sorolandó még, hogy igen magas hatásfokkal ( $\eta \sim 90\%$ ) átalakítható villamos energiává és szinte azonnal másodpercek alatt rendelkezésre áll a lendkerékben tárolt energia. A sok előny ellenére rendelkezik az eljárás hátrányokkal is, ugyanis nagyon magas befektetési költséget igényel, illetve a lendkerék felpörgetésének ideje huzamosabb ideig is eltarthat. Igen hasznos energiacsúcsok idején szinte rögtön képes pótolni a hiányt. Az elérhető maximális teljesítmény becsült értéke körülbelül 1,5 MW-ra tehető.

A következő rajz szemlélteti egy lendkeres villamos energiátárolás elvi vázlatát. Az első ábra a tároló feltöltését, a lendkerék felpörgetését illusztrálja. Az LK rövidítéssel jelölt lendkerék felpörgetéséhez a villamos gép motorként működik felhasználva a feleslegben termelt energiát vagy villamos energiát felhasználva a hálózatról.



3.6. ábra. A lendkeres energiátárolás elvi vázlata (Sembery)

A következő vázlaton ez az irány megfordul és a lendkerékben tárolt energia leadása, játszódik le. Ekkor a vázlaton LK rövidítéssel jelölt lendkerék a villamos gépet, mint generátort hajtja meg mely energiát ad le a hálózatnak (Sembery).



3.7. ábra. A lendkerékben tárolt energia leadása (Sembery)

A lendkerekes módszer előnyei:

- Nagy ciklusélettartam
- Igen magas hatásfokkal átalakítható villamos energiává ( $\eta \sim 90\%$ ) a csapágyvesztéstől illetve a légsúrlódástól függően
- Környezetbarát technológia
- Kis méret
- Karbantartása meglehetősen egyszerű
- Élettartama végén a felhasznált anyagok részben újrahasznosíthatóak illetve megsemmisíthetőek
- Elterjedt, főleg a kisebb teljesítmény tartományban (1 kW, 3h vagy 100 kW, 30s)

A technológia hátrányai:

- Nagyobb teljesítményeknél még fejlesztésre szorul
- Sokan veszélyesnek a hatalmas energiájú forgó tömeget
- A lendkerék felpörgetésének ideje huzamosabb ideig is eltarthat
- Magas költségigény 76000-152000 Ft/kW ([www.vet.bme.hu](http://www.vet.bme.hu)).

### 3.3 Elektromos energia tárolása kémiai kötés formájában

A kémiai energiatárolók csoportjába azok a természetes illetve mesterséges úton előállított energiahordozók tartoznak, melyek kémiai reakciók hatásaként fejtik ki hatásukat, ez történhet hő, villamos vagy mechanikai munka esetleg fény energiájának leadásával.

A legelterjedtebb kémiai reakció melyet energiateherfejlesztésre használnak az oxidáció. Leggyakrabban a levegő oxigéntartalmát hasznosítják oxidáló anyagként. A tüzelőanyagokat égetéssel hasznosítják és az energiatároló képességük jellemzésére az égésükkor felszabaduló fajlagos energiát, alkalmazzák. Attól függően, hogy az égés levegőben vagy tiszta oxigénben zajlik a fajlagos energia értéke más és más. Az oxidáció azonban végbemehet szabályozott folyamatként is, közvetlenül villamos energiaforrásként hasznosítható tüzelőanyag-cellákban.

A kémiai energiahordozókat **két nagy csoportra** oszthatjuk fel:

1. természetes energiahordozók, melyek a természetben képződtek korszakok alatt, ezek a fosszilis tüzelőanyagok: szén, olaj, földgáz.
2. mesterséges úton előállított energiahordozók.

Az első csoportba sorolt fosszilis energiahordozók helyettesítésére régóta folynak kutatások, illetve kísérletek kisebb-nagyobb sikerrel. A legnagyobb problémát talán az okozza, hogy ezek az energiahordozók felhasználás szempontjából a sok környezetre káros hatás mellett számos előnnyel rendelkeznek melyeket nehéz kiváltani más energiahordozók előállításával.

A fosszilis energiahordozók hasznosításának előnyei:

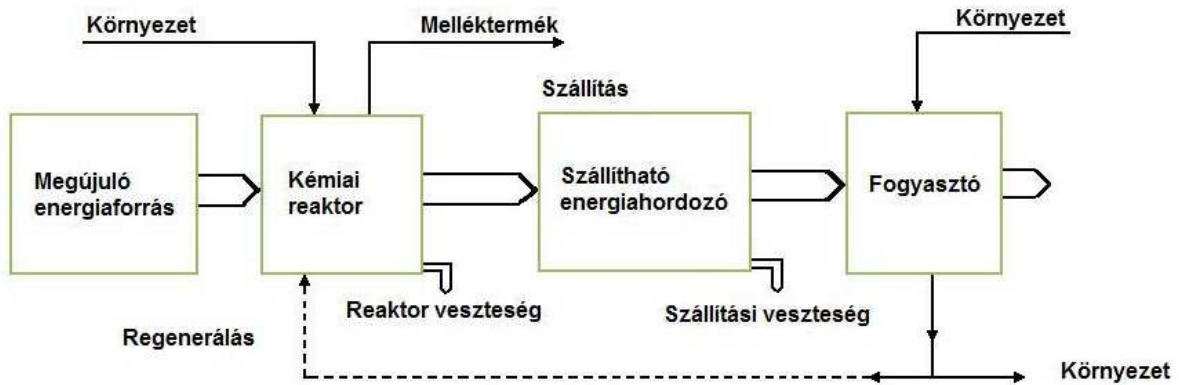
- meglehetősen nagy energiatároló kapacitással rendelkeznek, a legjobb természetes tüzelőanyagok, mint amilyen például a benzin, fajlagos energiája közelítőleg 45000 kJ/kg (12,5 kWh/kg)
- tárolásuk egyszerű, a normál környezeti hőmérsékleten megvalósítható
- az elosztáshoz, szállításhoz, tároláshoz szükséges infrastruktúra már ki van építve
- az elosztás illetve szállítás során fellépő veszteség kicsi

A fosszilis energiahordozók hasznosításának hátrányai:

- a kitermelhető mennyiség fogy illetve egyre költségesebb és bonyolultabb
- növekednek az előállítási költségek
- környezetszennyező hatás, a Föld ökológiai egyensúlyát veszélyezteti

### 3.3.1 Mesterségesen előállított tüzelőanyagok:

Ebbe a csoportba besorolt energiahordozók, olyan anyagok, amelyek egymással vagy a környezetben előforduló, legtöbbször szerves anyagokkal lépnek kémiai reakcióba, melyek által energiát termelnek. Ezek a kémiai reakciók megfelelő energia befektetésével megújíthatók, azaz az anyagok visszatérhetnek kiindulási állapotukba. A következő ábra szemlélteti ezeknek a mesterséges tüzelőanyagoknak az előállítását:

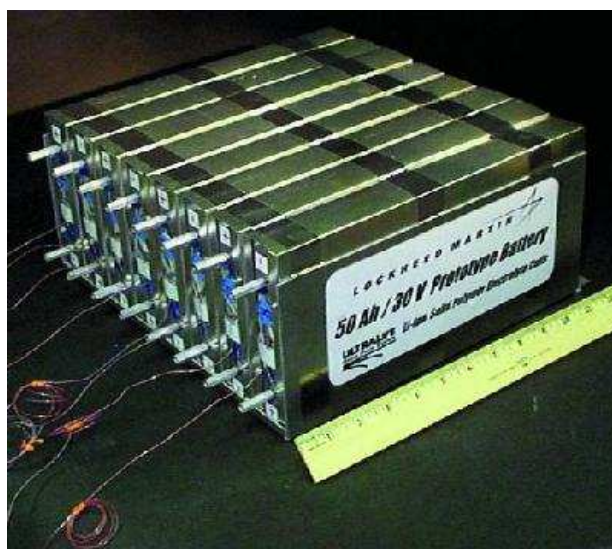


3.8. ábra. Mesterséges tüzelőanyag előállítása és felhasználása (Tóth)

A mesterséges tüzelőanyag előállítása kémiai reaktorokban történik, amely bármely energiaforrással működtethető így szerephez juthatnak a megújuló energiaforrások. Működéséhez a környezetből felhasználhat levegőt vagy akár vizet. A reaktorban képződő tüzelőanyagok, mint főtermékek mellett, melléktermékek is keletkezhetnek melyeket úgyszintén hasznosítanak, egy részét, pedig a környezetbe engedik. Az ábra is szemlélteti, hogy nagyon fontos része a folyamatnak az energiahordozó szállítása. A fogyasztás helyszínére szállított tüzelőanyagot a helyszínen alakítják át a fogyasztó számára szükséges energiává. Ehhez az átalakításhoz szintén a környezetből származó anyagokat hasznosítják. A rendszer anyagáramlási körfolyamata zárt, azonban nagy távolságokraállítás esetén ez a zártág nem közvetlen. A mesterségesen előállított energiahordozók közül a legjelentősebbek a hidrogén, a metanol és az ammónia. Lehetséges energiahordozók közé sorolhatjuk még a fémeket is, melyek sok helyen előfordulnak a természetben, azonban legtöbb esetben nem tiszta állapotban, hanem vegyület, oxid, hidroxid vagy sók formájában, ezért a tiszta fém kinyeréséhez nagy energia szükséges. A tiszta fémeket energiahordozóknak tekinthetjük, ugyanis megfelelő eljárásokat alkalmazva energia nyerhető belőlük, ezek közül a legfontosabbak a magnézium, cink, alumínium, szelén és a kalcium.

### 3.3.2 Elektrokémiai akkumulátorok

Az elektrokémiai akkumulátorok a kémiai energiatárolás egyik csoportját képviselik. Konkrétan kémiai reakciók által tárolják, illetve adják le a villamos energiát. Ezek a reakciók általában hőfelszabadulással járnak. Az akkumulátorok elektródákból illetve elektrolitból épülnek fel, ezek az elektrolitok különböző halmazállapotúak lehetnek: folyékony, zselé, szilárd.



3.6. kép. Szélerőmű által termelt villamos energia tárolására alkalmas akkumulátor  
([www.ujenergiak.hu](http://www.ujenergiak.hu))

<http://www.ujenergiak.hu/energia-technologiak/energiatarolas/455-uj-akkut-fejlesztettek-ki-a-megujulo-energia-tarolasara>

Az akkumulátorok villamos kivezetésére szolgálnak az elektródák. Ezen elektródák illetve elektrolitok anyagai között olyan kémiai reakciók zajlanak le, melyek villamos töltések cseréjével járnak együtt. A reakciók elindításához csupán a külső áramkört szükséges zárni, ezt nevezik kisütésnek. Ilyenkor a cellák aktív anyagának kémiai állapota megváltozik. Teljes kisütés során a cellákból több energia nem vehető ki újratöltés nélkül. Maga az elektroncsere a cellán kívül a fogyasztói áramkörön megy végbe. Az akkumulátorok jellemzésére szolgáló mennyiség a nyugalmi feszültség, amely a két elektróda között terhelésmentes állapotban mért állandó feszültség érték. A nyugalmi feszültség értéke függ az elektrolit összetételétől, az akkumulátor összetételétől illetve öregedési állapotától.

Az eredeti kiindulási állapot visszaállításához a kémiai folyamat visszafordítása szükséges, ezt nevezzük töltésnek. Töltés során külső energiaforrás szükséges, melynek hatására ellentétes áramlási irányú elektronvándorlás játszódik le, a cellákban kémiai reakciók által az aktív anyag újra felépül.

Az akkumulátorok legfontosabb jellemzője az energiatároló képessége, ami a napjainkban kapható akkumulátorok esetén 30-170 Wh/kg értékeket éri el és az energia-hatásfok, amely kifejezi, hogy a betöltött energia hány százalékát hasznosíthatjuk. Számtalan akkumulátortípust különböztethetünk meg és napjainkban is, folyik fejlesztésük.

Az akkumulátorok csoportosítása:

- Hagyományos felépítésű akkumulátorok
- Magas hőmérsékletű akkumulátorok
- Különleges akkumulátorok
- Újabb fejlesztésű akkumulátorok

A legelterjedtebb illetve legismertebb akkumulátorok a savas vagy ólom akkumulátorok és a nikkél-vas vagy a nikkél-kadmium lúgos akkumulátorok. Napjainkban környezetvédelmi okok miatt a nikkél-kadmium akkumulátorok gyártása illetve felhasználása tiltott ezért kifejlesztették az ehhez hasonló tulajdonságokkal rendelkező nikkél-fémhidrid (Ni-MH) akkumulátorokat (Sembery).



A következő táblázatban láthatjuk a hagyományos akkumulátorok néhány jellemző adatait:

3.1. táblázat. Hagyományos akkumulátorok műszaki adatai

Akkumulátor típus	Ólom akkumulátor	Nikkel-kadmium	Nikkel-fémhidrid
Üzemi hőmérséklet	-10-50 °C	-40-50 °C	-40-50°C
Elektrolit	Kénsav vizes oldata	Lúg vizes oldata	Lúg vizes oldata
Nyugalmi feszültség	2,1 V	1,35 V	1,35 V
Fajlagos energia	20-40 Wh/kg	30-50 Wh/kg	50-80 Wh/kg
Fajlagos teljesítmény	80-120 W/kg	100-150 W/kg	200-250 W/kg
Élettartam	400-750 ciklus	400-600 ciklus	600-1000 ciklus

A magas hőmérsékletű akkumulátorok jellemzője, hogy az elektróda anyaga valamilyen könnyű elemből, nátriumból, lítiumból épül fel, ezért ezeket nem lehet vizes elektrolittal egybeépíteni, ugyanis ezek egyből reakcióba lépnek a vízzel. Ebből az okból kifolyólag magas hőmérsékletű akkumulátorok esetén az elektrolit szerepét valamilyen szilárd halmazállapotú vagy szerves anyagok, olvasztott sók keveréke töltik be. Ahhoz, hogy ez az elektrolit a megfelelő vezetőképességgel rendelkezzen magas üzemi hőmérséklet szükséges. A magas hőmérsékletű akkumulátorok néhány jellemző adatait megtekinthetjük a következő táblázatban.

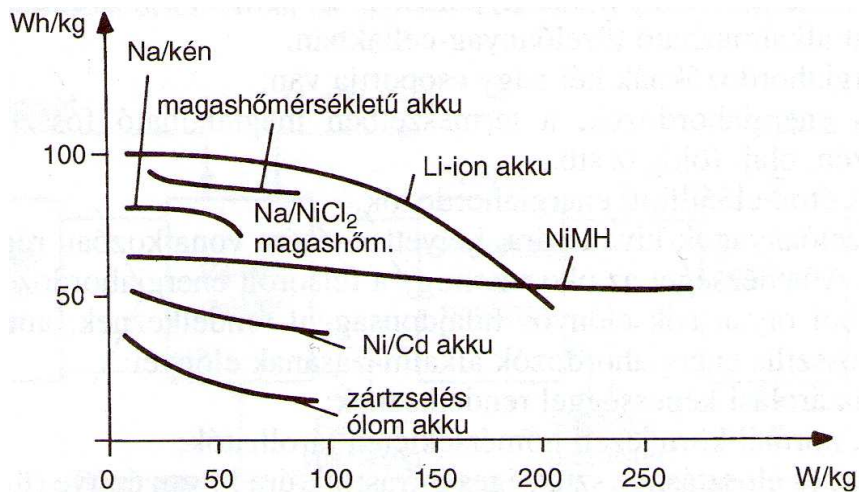
3.2. táblázat. Magas hőmérsékletű akkumulátorok műszaki adatai

Akkumulátor típus	Nátrium-kén	Nátrium-nikkelklorid	Lítium-vasszulfid
Üzemi hőmérséklet	~300 °C	~300 °C	~450 °C
Elektrolit	száraz elektrolit	száraz elektrolit	sóolvadék
Nyugalmi feszültség	2,1 V	2,6 V	1,35 V
Fajlagos energia	90-100 Wh/kg	80-90 Wh/kg	90-100 Wh/kg
Fajlagos teljesítmény	80-100 W/kg		200-400 W/kg
Élettartam	200-400 ciklus		170-200 ciklus

A különleges akkumulátorok felépítése különbözik a hagyományos akkumulátorokétól. A cink-bróm akkumulátorok példáján bemutatva az elektróda folyékony halmazállapotú és kívülről vezetik a cellába, ezen akkumulátorok esetén az elektróda anyaga, a kémiai reakcióhoz nélkülözhetetlen anyag a cellán kívül van. Cink-levegő akkumulátorok esetében a reakcióhoz szükséges anyag a kívülről hozzávezetett levegő.

Az újabb fejlesztésű akkumulátorok közé sorolhatók a lítium-ion és lítium-polimer akkumulátorok. Annak ellenére, hogy ez a technológiai is fejlődik nagy áttörést nem sikerült elérni a hagyományos akkumulátorokhoz képest.

Az elektrokémiai akkumulátorok jellemzésére leggyakrabban a Ragone-diagrammot használják, mely szemlélteti a különböző akkumulátor típusokhoz tartozó fajlagos energiatároló képességet a fajlagos teljesítménysűrűség függvényében. Ilyen Ragone-diagrammot szemléltet a következő diagramm:



3.9. ábra. Ragone-diagramm  
(Sembery)

Fajlagos teljesítmény alatt az akkumulátor tömegére vonatkoztatott pillanatszerű fajlagos teljesítmény leadását vagy felvételét értjük. Az akkumulátor feszültségértékének tudatában és a fajlagos teljesítmény adatából következtethetünk az akkumulátor áram-túlterhelhetőségére. Az elektrokémiai akkumulátorok megújuló energiaforrások esetén energiatárolóként csak azoknál az energiaforrásoknál alkalmazható, amelyek közvetlenül villamos energiát állítanak elő. Ilyen alkalmas megújuló energiaforrásnak tekinthető a szélenergia. Ha a szél erőssége, intenzitása elegendő, a szélérőművek a fogyasztók villamos energiaigényeiken felül az akkumulátort is töltik. Szél hiányában a fogyasztói igényeket az akkumulátorok próbálják kielégíteni. Fontos a villamos kapcsolat kiépítése szempontjából, hogy a szélérőmű ne üzemeljen fogyasztóként, mikor nem fúj a szél, ezt egy leválasztó egyenirányító diódával oldják meg, amely meggátolja, hogy a szélérőmű árama fordított irányú legyen (Tóth).



3.7. kép. Energiatárolás sorba kapcsolt akkumulátorokban  
(<http://idw-online.de>)

Elektrokémiai akkumulátorok előnyei:

- Széles körben alkalmazott kiforrott technológia
- Környezetbarát technológiává teszi az újrahasznosíthatóság, selejtezés, karbantartás
- Gyors reagálási képesség a töltésre
- Csendes és közvetlenül a terhelés közelébe helyezhető

Hátrányok:

- Érzékeny a hőmérsékletre
- Érzékeny a mélykisütésre
- Korlátozott töltési kisütési ciklusszámmal rendelkezik
- Tökeigénye savas ólom akkumulátorok esetén kb. 200-300\$/kW

### 3.3.3 Hidrogén mint energiahordozó:

A fosszilis tüzelőanyagok kőolaj, szén, földgáz, benzin helyettesítésére, kiváltására legalkalmasabb anyag a hidrogén.

Legfőbb jellemzői:

- A hidrogén energiatároló képessége a fosszilis energiahordozókra jellemző érték többszöröse. Fajlagos energiatárolási képessége, tiszta oxigénnel elégetve ~120000 kJ/kg (32,5 kWh/kg), ha azonban levegővel égetjük ez az érték kevesebb.
- Normál légköri nyomáson (101325 Pa) és hőmérsékleten a hidrogén gáz halmazállapotú és sűrűsége meglehetősen kicsi: 0,009 kg/m<sup>3</sup>. Ebből következtethetünk arra, hogy a fajlagos energiája a térfogatára vonatkoztatva kicsi.
- Legelőnyösebb tulajdonságaként említhető, hogy amennyiben égése tiszta oxigénnel történik vízgőz, keletkezik mely ártalmatlan a környezetre nézve, ha azonban levegővel történik az égés a vízgőz mellett nitrogén-oxid, illetve nitrogén-dioxid keletkezik melynek ugyancsak káros hatásai, vannak a környezetre nézve.
- A hidrogén hátrányaihoz sorolható, hogy nagyon nehezen cseppfolyósítható, ugyanis cseppfolyósításához nagyon alacsony hőmérsékletre van szükség, -252 °C hőmérséklet kell. Azon felül, hogy nagyon alacsony hőmérsékletet, azaz nagy energiaráfordítást igényel a cseppfolyósítás a cseppfolyós állapotban tartáshoz bonyolult és meglehetősen költséges kriosztátra, van szükség.
- Hátrányai, közé tartozik a szivárgás- és robbanásveszély, ezért a hidrogént tároló, szállító és felhasználó berendezések fokozott ellenőrző és biztonsági eszközöket igényelnek.

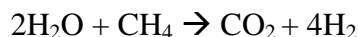
#### 3.3.3.1. A hidrogén előállítása:

A hidrogén előállítására többféle eljárást szoktak alkalmazni, e folyamatok közül többnél lehetséges a megújuló energiaforrások alkalmazása.

A hidrogén előállításának módjai:

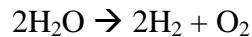
- Földgázból
- Vízből elektrolízissel
- Vízből termikus disszociációval
- Biogázból és bomlástermékből
- Ammóniából

Jelenleg, napjainkban a legtöbb hidrogént metán átalakításával állítják elő, vízgőz hozzáadásával. Az eljárást reformálásnak, a keletkező hidrogént, pedig reformált hidrogénnek nevezzük. A reformálás eljárását a következő reakcióegyenlet szemlélteti:

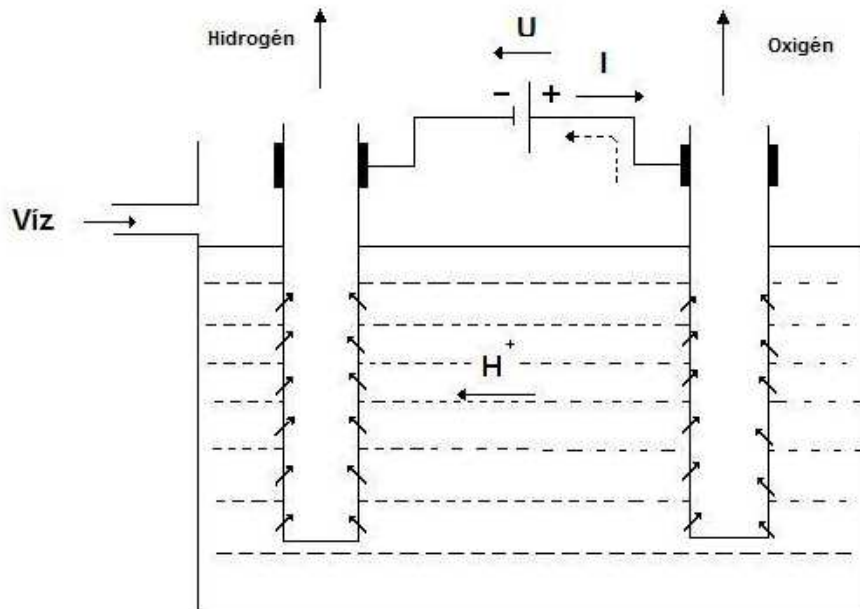


Ennél az eljárásnál a megújuló energiát, pl. a vízgőz előállítására lehet felhasználni. Sajnos ennél a folyamatnál a szén-dioxid keletkezése elkerülhetetlen.

Hidrogén előállítható vízből elektrolízissel, vízbontás során hidrogén és oxigén keletkezik. Elektromos áram hatására az elektródák egyikén (katódon) hidrogén, a másikon (anódon) oxigén válik ki mely reakciót a következő egyenlet, szemlélteti:



A víz elektrolíziséhez használt berendezés vázlatos rajzát szemlélteti a következő ábra. A berendezés estében az elektrolit maga a felbontandó víz, ebbe merül bele a két elektróda.



3.10. ábra. Víz elektrolízise (Tóth)

A vázlaton a vízbontáshoz szükséges áramirányt a folytonos vonal, az elektronok áramlásának irányát a szaggatott vonal jelzi. Újabb kutatások során kifejlesztettek magas üzemi hőmérsékletű, szilárd elektrolitú vízbontó berendezéseket is melyek villamos energia és hő felhasználásával üzemelnek. E berendezés előnye, hogy magasabb hőmérsékleten jobb hatásfokú kémiai reakciók hozhatók létre, és kisebb veszteségek lépnek fel. Magasabb hőmérsékletű vízbontók esetén kisebb teljesítményre illetve feszültségre van szükség, mint alacsonyabb hőmérsékletű vízbontók esetén.

Az elektrolízishez villamos energia, a magas hőmérsékletű vízbontáshoz, pedig ezen kívül hő közlés is szükséges. Az elektrolízis meglehetősen energiaigényes, költséges megoldás így keresik a legoptimálisabb, leggazdaságosabb megoldást. Az elektrolízishez használható minden olyan megújuló energiaforrás, amely villamos energiát állít elő, így a szél-erőművek ennek a feltételnek megfelelnek.

A hidrogén előállításának másik módja mikor vízből termikus disszociációval, hőközléssel végezzük az eljárást, ehhez azonban csak azok a megújuló energiaforrások alkalmazhatók melyek hőt termelnek.

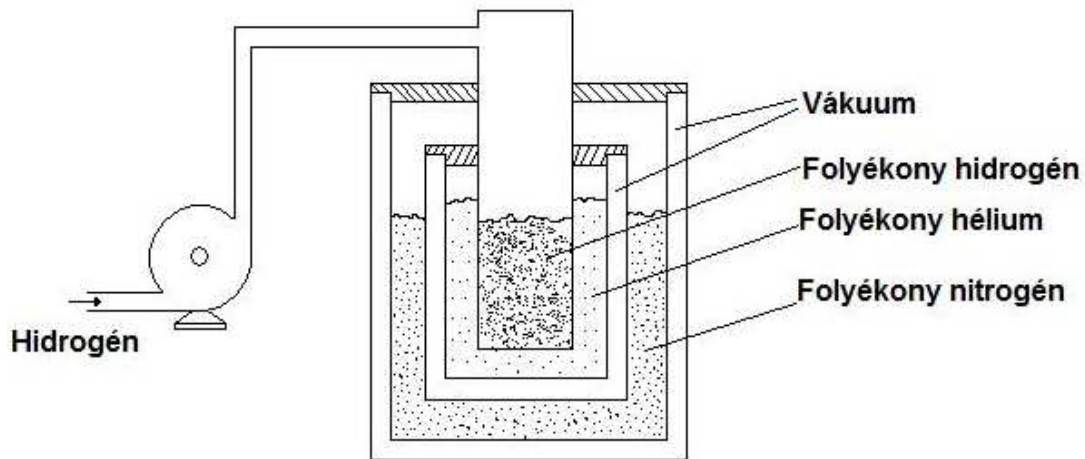
### 3.3.3.2. A hidrogén tárolása és szállítása:

A hidrogén szállítására és tárolására három féle lehetőség kínálkozik:

1. Nagynyomású gázként, gáztartályban, vagy csővezetékben. Azért célszerű ennél a tárolási formánál nagy nyomást alkalmazni, mert légköri nyomáson illetve hőmérsékleten igen kicsi a sűrűsége. Nagy nyomás mellett a tároláshoz szükséges térfogat csökkenthető. Ez a nyomás érték általában 16-68 MPa (160-680 bar). A tartálynak megfelelő, a nagy nyomást

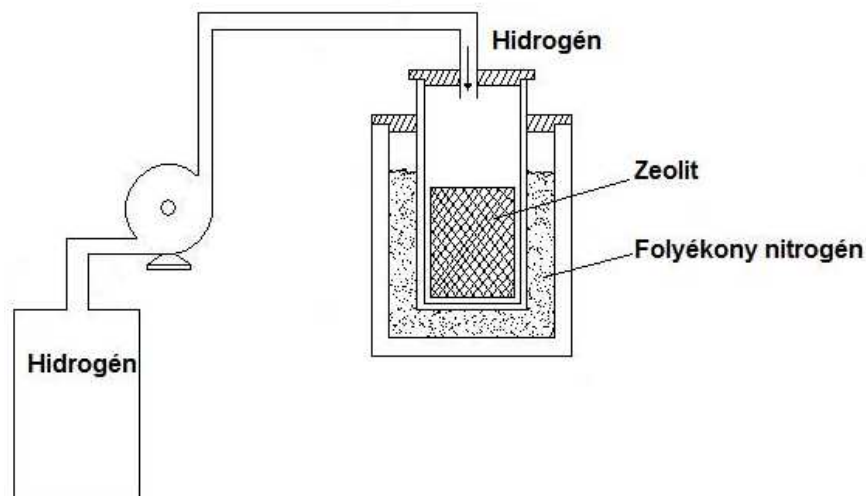
elviselő anyagból kell készülnie, ami acél vagy karbon-fiber bevonatú alumínium. A hidrogén gáz a földgázhoz hasonlóan vezetékben is szállítható azonban ebben az esetben a nyomásnak kisebbnek kell lennie (kb. 8MPa) és a szállítási veszteség nagyobb.

2. Kriotechnikai berendezéssel cseppfolyós alakban tárolva. Ebben az esetben a hidrogént először cseppfolyós állapotba kell hozni, melyhez igen drága berendezés kriosztát szükséges, amivel elérhető a  $-252\text{ °C}$  cseppfolyósodáshoz szükséges hőmérséklet. A hidrogén cseppfolyósítása esetén a folyékony nitrogén nem elegendő, ennél az eljárás bonyolultabb. Kettős hűtőrendszerrel rendelkező kriosztátot szükséges alkalmazni hélium és folyékony nitrogén felhasználásával.



3.11. ábra. Cseppfolyós hidrogén előállításához szükséges kriosztát (Sembery)

3. Fémhidrid alakban, fémbe elnyelve. Egyes fémötvözetek nagy mennyiségű hidrogént képesek adszorbeálni, ilyen fémötvözetek az alkáli-alumínium-szilikátok a zeolitok. A zeolitok gázelnyelését azzal a felülettel jellemezhetjük, amelyik az adott tömegű anyag esetén az elnyeléshez rendelkezésre áll. Ez az elnyelő felület zeolitok esetén  $1000\text{ m}^2/\text{g}$ . Ebből következik, hogy 1 liter atmoszférikus nyomású gáz kb. 10 g tömegű zeolitban képes adszorbeálódni. Az adszorbeálható gáz mennyisége alacsony hőmérsékleten nagyobb ezért a zeolitokat folyékony nitrogénnel szokták lehűteni. A következő sematikus vázlat szemlélteti az adszorpciós berendezést.



3.12. ábra. Az adszorpciós berendezés szerkezeti vázlat (Tóth)

A zeolitet tartalmazó belső tartályt egy kettősfalú folyékony nitrogénnel töltött hőszigetelt tartályba merítik. A hidrogén illetve a gáz molekulákat az adszorpciós szivattyú szállítja a zeolit felületére, hogy ott adszorbeálódjanak. Az eljárás befejeztével a zeolit szállíthatóvá válik. A fémhidridben tárolt hidrogén hőközléssel szabadítható fel (Sembery).

Hidrogén alapú energiatárolás előnyei:

- Környezetbarát technológia
- Tiszta üzemanyag
- Teljes teljesítményskála átfogható vele
- Tárolási idő több hónap is lehet
- A rendszer töltési, kisütési sebessége illetve tárolási kapacitása egymástól függetlenül megváltoztathatók
- Egyéb célokra is felhasználható
- Szállítható, nem helyhez kötött

A hátrányai:

- A technológia nem teljes mértékben kiforrt, egyes elemei még kidolgozásra szorulnak
- Az eredő hatásfok ~ 30-40 %
- Tökeigényes eljárás ([www.vet.bme.hu](http://www.vet.bme.hu))

### 3.4 A metanol mint az energiatárolás egyik lehetséges megoldása:

A metilalkohol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) akár csak a hidrogén kitűnő tüzelőanyag. A metanol felfogható, mint a hidrogén előállításának egyik lehetséges formája, ugyanis a kémiai reakciók többségében a metanol hidrogénre illetőleg szén-monoxidra bomlik. Ez a bomlási tulajdonsága az, amely lehetővé teszi tüzelőanyagként való felhasználását. A hidrogénhez képest azonban rendelkezik egy sokkal, előnyösebb tulajdonsággal, mégpedig azzal, hogy normál nyomáson és hőmérsékleten halmazállapota folyékony, így például szállítása, tárolása és kezelése sokkal egyszerűbb illetve veszélytelenebb, mint a hidrogéné. Fajlagos energiatároló képessége kb. 20000 kJ/kg (5,55 kWh/kg). Összehasonlításnál feltűnik, hogy ez az érték jóval kevesebb, mint a hidrogén esetében és megközelítőleg fele a benzín fajlagos energiatároló képességének. Az imént említettek mellett, további hátrányos tulajdonsága, hogy levegővel való égetése során vízgőz mellett nitrogén-dioxid és szén-dioxid is keletkezik.

A metilalkoholhoz hasonló tulajdonságokkal bír az ammónia ( $\text{NH}_3$ ). Fajlagos energiatároló képessége valamivel kevesebb, mint az előzőleg említett metilalkoholnak kb. 16700 kJ/kg (4,65 kWh/kg). Sajnálatos módon a metanolhoz hasonlóan levegővel való elégetésekor a vízgőz mellett nitrogén-dioxid és szén-dioxid is keletkezik (Sembery).

Az energiahordozók energiáját, legnagyobb részt égetéssel hasznosítják. Az égetéskor felszabaduló fajlagos energia különbözik attól függően, hogy az égés levegővel vagy tiszta oxigénnel történik, a következő táblázat, szemlélteti, a tiszta oxigénnel való égés adatait:

3.3. táblázat. Energiahordozókhoz tartozó fajlagos energia értékek

Energiahordozó	Égéshő [kJ/kg]	Fűtőérték [kJ/kg]
Acetilén	50244	48570
Ammónia	22484	18632
Benzin	46685	42498
Bután	49547	45763
Gázolaj	45010	42917
<b>Hidrogén</b>	<b>141897</b>	<b>120083</b>
Metán	55561	50077
<b>Metanol</b>	<b>22317</b>	<b>19511</b>

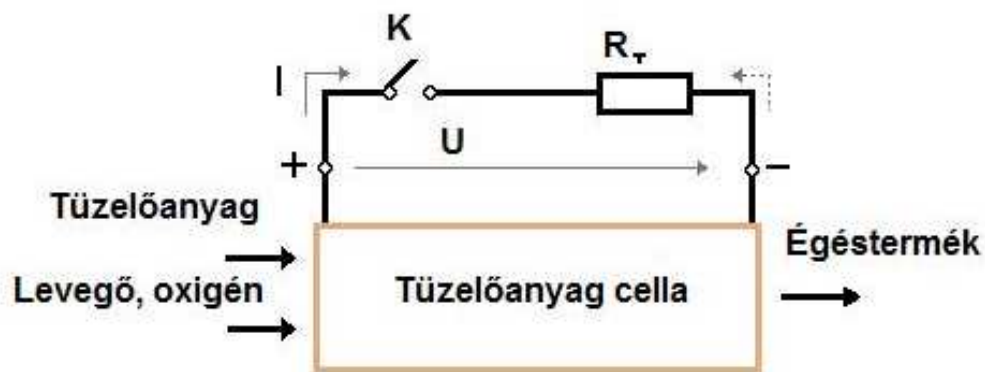


Petróleum	42917	40823
Propán	50370	46392
Szén-monoxid	10091	10091

Amennyiben az égés nem tiszta oxigénben, hanem levegőben megy végbe, akkor a kinyerhető hő a fűtőértéknél is kisebb. A táblázatban feltüntetett értékek csalókák, ugyanis ha az oxidáló anyag tömegét is számításba vesszük, akkor ezek az értékek jelentősen csökkennek. 1kg benzín elégetéséhez kb. 3 kg oxigén szükséges, ebből következik, hogy az égéshez szükséges összes tömeg mellyel számolnunk kell 1kg helyett 4 kg lesz, így a fajlagos energiája is negyedére csökken (Sembery).

### 3.5 Tüzelőanyag-cellák:

Napjainkban óriási figyelem illetve kutatás kíséri az alternatív energiaforrásként említhető tüzelőanyag-cellákat. A tüzelőanyag cellákról, mint elektrokémiai, egyenfeszültségű villamos energiaforrásokról beszélhetünk, amely két villamos kivezetéssel rendelkezik. Az elektródák közti térben található az elektrolit, mely halmazállapota szerint lehet folyékony vagy szilárd. A tüzelőanyag-cellák folyamatosan hasznosítják a rendelkezésre álló tüzelőanyagokat a villamos energia előállításának érdekében. A tárolási funkciót a tüzelőanyag tartály látja el. A cella működése az üzemanyag ionos elektrokémiai oxidációján alapszik. Az optimális működés feltétele, hogy a cella aktív anyagának egyik komponensére nézve az oxidáció illetőleg a disszociáció más-más elektródán történjen. Ennek érvényesülése teljesíti azt a feltételt, hogy az akkumulátorokhoz hasonlóan az elektroncsere a cellán kívüli áramkörön, a fogyasztón keresztül történjen. A kémiai reakció, ezáltal a villamos energiatermelés mindaddig fenntartható, míg az elektródákhoz a szükséges reaktánsokat hozzávezetik (Sembery). A következő vázlatos rajz szemlélteti leegyszerűsítve egy tüzelőanyag cellára jellemző áram, illetve feszültség irányokat:



3.13. ábra. Egy tüzelőanyag-cellás energiaforrás elvi vázlata (Sembery)

A szürke szaggatott vonallal jelölt áramirány az elektronok valódi vándorlási irányát mutatja. Mikor az ábrán a K jelzéssel ellátott kapcsoló nyitott állapotban van illetve  $I = 0$  az energiaforrás üresjárási állapotban van. Ebben az állapotban a kapcsolón mérhető feszültség  $U = U_0$  ez az üresjárási feszültség. Terhelési állapotnak nevezzük mikor a K kapcsoló, zárva van és az  $R_T$  ellenállással jelölt fogyasztón áram, folyik. Ilyenkor a kapcsolón mérhető feszültség  $U < U_0$  a terhelésen folyó áram  $I = U/R_T$ . Az üresjárási feszültség ( $U_0$ ) cellatípustól függően eltérő nagyságú, általában cellánként 1V nagyságrendű. Növekvő terhelőáram esetén a kapocsfeszültség nemlineárisan csökken.

A feszültségesést két tényezőre vezethetjük vissza:

1. a cella  $R_b$  belső ellenállásán eső  $IR_b$  feszültség miatt
2. az  $U_p$  polarizációs feszültség miatt

A kapocsfeszültség kiszámítható a következő egyenlet szerint:

$$U = U_0 - IR_b - U_p$$

A belső ellenállás függ:

- Tüzelőanyag-cella típusától
- Üzemi hőmérsékletétől
- Elektrolit anyagától
- Tüzelőanyag nyomásától

A polarizációs feszültség magától az elektrokémiai folyamattól és intenzitásától függ.

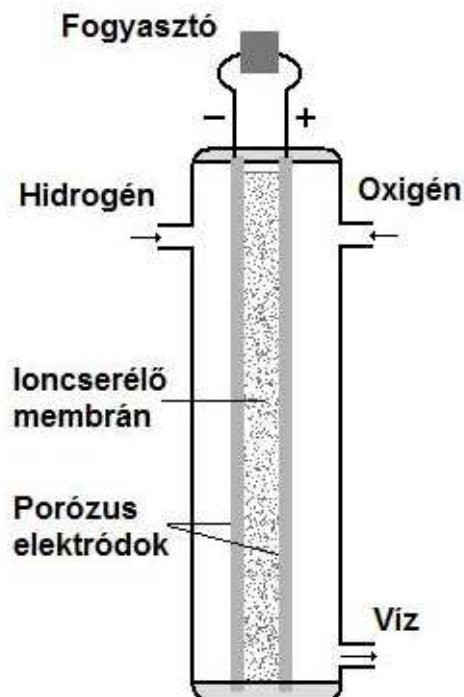
### 3.5.1 Tüzelőanyag-cellák által felhasznált tüzelőanyagok:

A tüzelőanyag típusa szerint a tüzelőanyag-cellákat a következő csoportokba sorolhatjuk:

- Direkt hidrogén alapú tüzelőanyag-cellák
- Reformált hidrogénnel működő tüzelőanyag-cellák
- Direkt metanollal működő tüzelőanyag-cellák
- Egyéb tüzelőanyaggal működő cellák (Sembery).

Leggyakoribb formája a tüzelőanyag-celláknak a hidrogén-alapú, működéséhez a hidrogén gáz halmazállapotú formáját hasznosítják néhány bar nyomáson. Közönséges galvánelemekhez hasonlíthatjuk őket a különbséggel, hogy a reakcióhoz szükséges reaktánsokat külső forrás biztosítja, azok a cella szerkezeti elmei közé nem sorolandóak (Atkins).

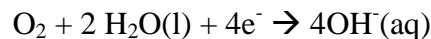
A következő sematikus rajz szemlélteti a hidrogén/oxigén cellát:



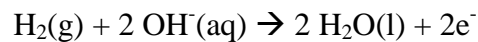
3.14. ábra Hidrogén/oxigén tüzelőanyag-elem egy cellája (Atkins)



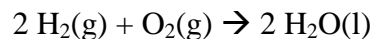
Ezen cella esetében az elektrolit általában egy 200°C-on és 20-40 atm nyomáson tartott kálium-hidroxid oldat, az alkalmazott elektródok, pedig nikkelporból összesajtolt porózus lapok. A kémiai reakció folyamán, a katódon redukció zajlik:



Az anód esetében oxidáció folyik melyet a következő reakcióegyenlet ír le:



A teljes cellareakció a következő spontán exoterm reakció szerint történik:



A reakció hatékonysága 200°C-on nem olyan kielégítő, mint 25°C-on azonban a 40 atm nyomás ezt kompenzálja, ezáltal a cellapotenciál felveheti az  $E \sim 1,2 \text{ V}$  értéket. A hidrogén/oxigén rendszer előnye, hogy maga a hidrogén meglehetősen nagy csereáram-sűrűséggel rendelkezik ellentétben az oxigénnel melynek csereáram-sűrűsége csupán a  $0,1 \text{ nA/cm}^2$  értéket veszi fel ez által meghatározva cella maximális áramát. A probléma kiküszöbölésére nagy fajlagos felülettel rendelkező katalitikus elektródot alkalmaznak.



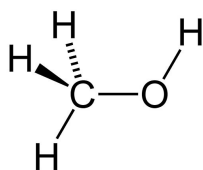
3.8. kép. Üzemanyagcella  
([www.nyf.hu](http://www.nyf.hu))

A reformált hidrogénnel üzemeltetett tüzelőanyag-cellák abban különböznek az előbbtől, hogy a tüzelőanyag nem hidrogén, hanem a hidrogén előállítására alkalmas szénhidrogén tartalmú gáz, metanol, biogáz stb. A reformer az a berendezés mely segítségével hidrogént állíthatunk elő az említett anyagokból. Metanolból ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) és vízgőzből hidrogént szabadít fel a következő reakcióegyenlet szerint:



Ezek a reformerrel ellátott tüzelőanyag-cellák szintén hidrogén-alapú cellák, ami helyileg előállított hidrogénnel üzemel.

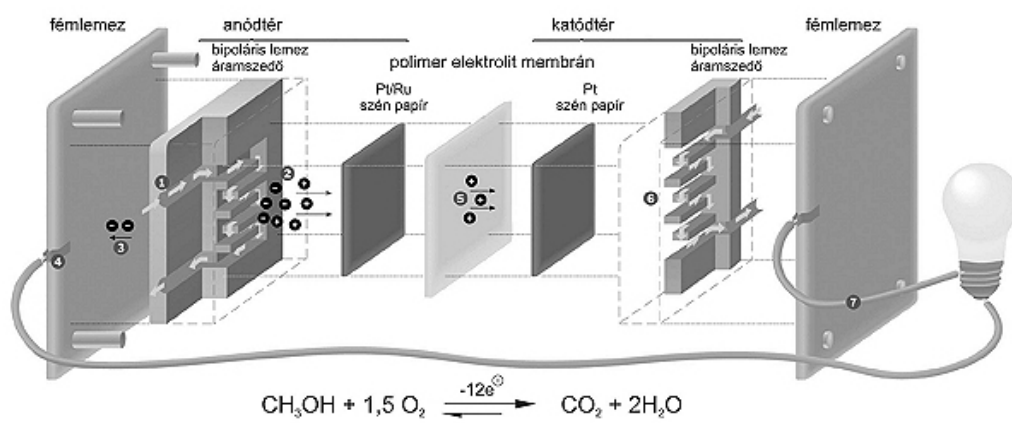
### 3.5.2. Direkt metanolos üzemanyagcella (Direct Methanol Fuel Cell – DMFC)



3.15. ábra. Metanol molekula

Direkt metanollal működő tüzelőanyag-cellák esetén a tartályban tárolt üzemanyag folyékony halmazállapotú metanol. Szilárd polimer elektrolittal készül és alacsony hőmérsékleten 110°C-on működtethető (Tóth). Az eljárás a metil-alkohol oxigénnel vagy levegővel történő oxidációján alapszik mely során végtermékként villamos áram, víz és szén-dioxid keletkezik.

Az eljárás elvét a következő sematikus ábra szemlélteti:



3.16. ábra. Metanollal működő üzemanyagcella  
(<http://epa.oszk.hu>)

A módszer során egyidejűleg az anódtérbe 3%-os metil-alkoholt a katód térbe oxigént vezetnek. A platina/ruténium ötvözetből álló katalizátoron elektronok szabadulnak fel víz és CO<sub>2</sub> keletkezése közben. Elektromos áram jön létre. A protonok a katódtérbe vándorolnak, majd a protonok, elektronok és oxigén egyesülésével víz keletkezik. Kutatások alátámasztják, hogy a kémiai folyamat megfordítása is lehetséges (Reményi).

Másik elterjedt formája a tüzelőanyag-celláknak mikor foszforsav elektrolit mellett hidrogén illetve levegő keveredésével működtetik 200°C-on. E cellák teljesítménye már eléri a 10 MW nagyságrendet.

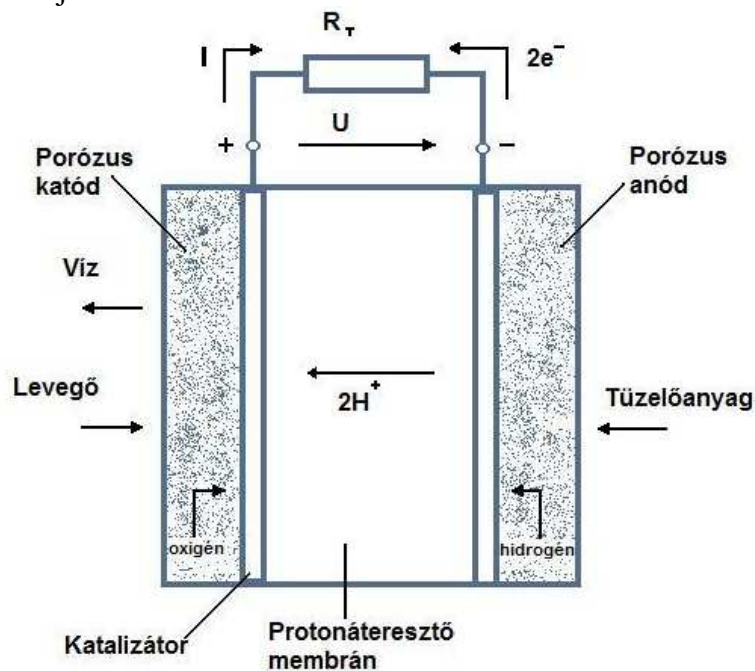
Számtalan fajtája említhető a tüzelőanyag celláknak és számos kutatás folyik újabb, hatékonyabb formáció kialakítására. Léteznek cellák, amelyekben karbonátok olvadékát hasznosítják elektrolitként, azonban ezeknek az üzemhőmérséklete már a 600°C-ot eléri.

Kifejlesztettek már olyan tüzelőanyag-cellákat is melyek 100°C-on üzemelnek, és szilárd elektrolitot tartalmaznak, ilyen szilárd elektrolitnak alkalmasak a különböző szilárd halmazállapotú polimerek. Ennek a konformációnak azonban hátránya, hogy igen magas tisztaság fokú hidrogént igényelnek a tartós működéshez, mely hatalmas költségeket jelent (Atkins).

### 3.5.3. PEM (Proton Exchange Membran) cella, protonáteresztő membrános tüzelőanyag-cella:

Szilárd elektrolitú cella, amely alacsony hőmérsékleten 70-90°C-on képes üzemelni. Hidrogén tüzelőanyaggal működik és a kémiai reakció folyamán víz, keletkezik végtermékként. Az

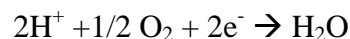
elektrolit szerepét leginkább protonáteresztő tulajdonsággal bíró, vízzel nedvesített, leginkább platina bevonatú, szilárd műanyag lemez, polimer membrán látja el. A platina bevonat, mint katalizátor működik. Ezen membránok alkalmazhatóságának hála a folyékony elektrolit elhanyagolható illetve maga a cella alacsonyabb hőmérsékleten üzemeltethető. Egy PEM cella sematikus vázlatát láthatjuk a következő ábrán:



3.17. ábra. PEM cella vázlata  
(Tóth)

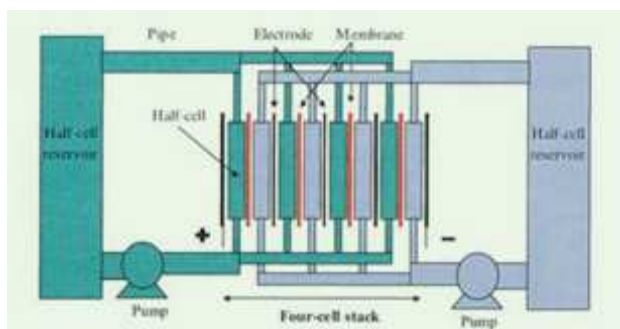
Ahogy az elvi vázlat is szemlélteti a hidrogént és az oxigént a porózus anódhoz, illetve katódhoz vezetik. Az anódon a hidrogén protonra és elektronra bomlik. A hidrogénion, proton számára a membrán áteresztő tulajdonsággal bír, míg az elektronokat nem engedik át, így az elektronok a külső áramkörön kényszerülnek áramolni. Amennyiben a külső kör zárt, a fogyasztón villamos áram jön létre (Tóth).

Amikor a hidrogénionok átjutnak a membránon reakcióba lépnek az oxigénnel úgy, hogy a külső áramkörön áramló elektronok felvételére is sor kerül:



### 3.5.4. Egyéb tüzelőanyaggal működő cella:

A MAVIR (Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság) megbízásából 2008. júniusában készítették egy tanulmányt az energia lehetséges tárolási módszereiről, annak érdekében, hogy Magyarország tekintetében is nagyobb szerepet kapjanak a megújuló energiát hasznosító erőművek telepítése. Ez a tanulmány 16 lehetséges módszert tartalmaz azonban ezek közül a leoptimalisabb módszernek, lehetőségnek a Vanádium Redox Battery (VRB) elektrokémiai energiatárolási rendszer bizonyult. Ennek a módszernek a vázlatos rajzát szemlélteti a következő rajz:



3.18. ábra. Vanádium Redox Battery  
(<http://zoldtech.hu>)

Az eljárás a vanádium különböző ionos formáinak oxidálásán illetve redukálásán alapszik. A vanádium részecskék híg kénsavban feloldva fogadják be, illetve adják le az elektronokat. Ez szolgál a reakció során elektrolitként. Az egész rendszer lelke a proton áteresztő membrán. A tüzelőanyag-cellán két szivattyú hajtja át az elektrolitot. Az eljárás működési elve a következők szerint folyik, töltésnél az akkuba áramlanak az elektronok, és a protonok áramlása egyenlít, majd a kisütéskor a hidrogén ionok visszaáramlása elektronokkal látja el a hálózatot.

A VRB rendszer előnyei:

- Gyors reakcióidő, msec nagyságrendben mérhető
- Üzemhőmérséklete 10-40°C
- A módszerrel kiküszöbölhető a szél erőművek teljesítményingadozása

(<http://zoldtech.hu/cikkek/20110117-energiatarolas/dokumentumok/balogh.pdf> ).

### 3.5.5. Tüzelőanyag-cellák nyomás illetve hőmérséklet értékei:

A hőmérséklet tekintetében tüzelőanyag-cellák esetében megkülönböztethetünk alacsony, illetve magas hőmérsékleten üzemeltetett cellákat. A 250°C alatti hőmérsékleten működőket, kis hőmérsékletű tüzelőanyag-celláknak, a 250-1200°C közötti hőmérsékleten üzemeltetett cellákat magas hőmérsékletű celláknak hívjuk. Kis teljesítményű energiaforrásként az alacsony hőmérsékletű legfőképpen a 100°C alatti cellákat alkalmazzák. Ilyeneket használnak például villamos autókban, autóbuszokban.

Nyomás szempontjából megkülönböztetünk 5 bar alatti kis, illetve 5-60 bar nyomás közötti magas nyomású cellákat. A cellák a hőmérséklettől függetlenül lehetnek kis és magas nyomásúak.

A következő táblázatban a 100°C hőmérséklet alatt üzemeltetett tüzelőanyag-cellák adatai láthatóak:

3.4. táblázat. 100°C alatt üzemeltetett tüzelőanyag-cellák műszaki adatai

	Hagyományos cella	PEM cella
<b>Elektrolit</b>	KOH oldat	Polimer membrán
<b>Üzemi hőmérséklet</b>	80-200°C	80°C
<b>Tüzelőanyag</b>	Hidrogén	Hidrogén
<b>Oxidáló anyag</b>	Oxigén	Oxigén
<b>Hatásfok</b>	40-50 %	40-50%
<b>Teljesítménytartomány</b>	0,1- 20 kW	0,1-100 kW
<b>Alkalmazás</b>	Kisfogyasztók	Járművek, kisfogyasztók

A következő táblázat a 100°C-nál magasabb hőmérsékleten üzemeltetett üzemanyagcellák jellemzőit szemlélteti:

3.5. táblázat. 100°C-nál magasabb hőmérsékleten működő üzemanyagcellák műszaki adatai

	Foszforsavas cella, PAFC	Olvadt karbonátos cella, MCFC	Cirkónium kerámiás cella, SOFC
<b>Elektrolit</b>	Foszforsav	Olvadt só	Kerámia
<b>Üzemi hőmérséklet</b>	190-210°C	650°C	800-1000°C
<b>Tüzelőanyag</b>	Hidrogén	Hidrogén	Hidrogén, szén-monoxid
<b>Oxidáló anyag</b>	Oxigén	Oxigén	Oxigén
<b>Hatásfok</b>	≥50%	≥50%	≥50%
<b>Teljesítménytartomány</b>	≥10MW	≥100MW	≥100MW
<b>Alkalmazás</b>	Villamos erőművek	Villamos erőművek	Villamos erőművek

### 3.6 Elektromos energia tárolása elektromos eszközökben - Szuperkapacitás

Egyetlen módszerként említhető, amely közvetlenül a villamos energiát tárolja. A szuperkapacitások egy speciális elektrokémiai nano-technikával készült különleges kondenzátoroknak tekinthetők, melyek nagy kapacitással: 500-5000 F, kis veszteségekkel és nagy élettartammal jellemezhetők és hatalmas csúcsteljesítmények felvételére illetve leadására képesek. Fajlagos energiátároló képessége a hagyományos kondenzátor képességeit jóval meghaladja. Hagyományos kondenzátorok esetén 400J/kg ~ 0,1 Wh/kg értékekről, míg szuperkapacitások esetén 18 kJ/kg ~ 5 Wh/kg értékekről beszélhetünk. Egy-egy szerkezeti elem feszültség értéke ~5V ezért legtöbbször az elemek sorba kapcsolásával próbálják ezt javítani. Mint kondenzátorok esetén ebben az esetben is fegyverzetről beszélhetünk melyek vagy tekercseltek vagy, rétegelt síkalakúak. Az ultrakapacitások speciálisan nagy fajlagos felülettel rendelkező anyagokból készülnek.

Az elektródák közti anyag lehet:

- Karbon-fémrost kompozit
- Habkarbon
- Szintetikus monolitikus karbon
- Polimer film karbon
- Fém oxidréteg



3.9. kép. Szuperkapacitás  
(<http://ultracapacitor.net>)

Az elektródák közti távolság 1 nm-nél kisebb. Ultrakapacitások gyártásával napjainkra már világszerte foglalkoznak cégek, mint például: ESMA, ELIT, NESS, Power Cashe, SAFT. Az ultrakapacitások típusától függően a pillanatszerű 2,5 kW/kg fajlagos teljesítményértékekről is beszélhetünk, ezt azt jelenti, hogy 1kg tömegű 2,5V-ra feltöltött szuperkapacitáson 1000 A áram is megengedhető időlegesen (Tóth).

A módszer előnyei:

- A nanotechnológiának köszönhető kis méret
- Gyors tölthetőség
- Hosszú élettartam
- Magas eredő hatásfok 86%
- Alacsony üzemhőmérséklet

Ultrakapacitások hátrányai:

- Az egy cellára eső feszültségértékek ~5V körüli értékeket vesznek csak fel.
- Tárolási kapacitása az eddigi fejlesztésekig kb.100 kW
- Rövididejű energiaszolgáltatást biztosít ([www.vet.bme.hu](http://www.vet.bme.hu)).

## 4. EREDMÉNYEK

### 4.1. A tárolási módszerek fizikai paramétereinek jellemzése

4.1.táblázat. Az energiatároló módszerek műszaki adatai

Elektromos energia tárolása mechanikai energia formájában						
	Energiatárolás mennyisége [TJ, PJ, Ah]	Energiasűrűség [kWh/kg] [GJ/kg]	Tárolási idő [év]	Befektetési költség [Ft/kW]	Tárolási technológia eredő hatásfoka [%]	Ciklus élettartam [db]
Szivattyús-tározós erőmű	80 GJ	1,38*10 <sup>-4</sup> kWh/kg	3perc-3nap [2]	190000 [2]	70-80 [2]	>10000 [1]
Sűrített levegő	1 GJ	0,2377 kWh/kg	20perc-3nap [2]	81000 [2]	85 [2]	>10000 [1]
Lendkerék	246,49 MJ	2,8 kWh/kg	20s-20perc [2]	152000 [2]	90 [2]	>10000 [1]
Elektromos energia tárolása kémiai energia (kötés) formájában						
Vízbontás hidrogénre	0,11962476 GJ	32,9663 kWh/kg				
Metanol előállítás	0,71503668 GJ	6,1991 kWh/kg				
Üzemanyagcella: Hidrogénalapú	0,11342448 GJ	31,2576 kWh/kg	3h - 4hónap [2]		30-50 [3]	>10000 [1]
Pb-Akkumulátor	1,296 MJ	36 Wh/kg	20s-3nap [2]	47500 [2]	60-80 [2]	400-750 [1]
Li-akkumulátor	10,8 kJ	30 Wh/kg	20s-3nap [2]	47500 [2]	60-80 [2]	200-300 [1]
Elektromos energia tárolása elektromos eszközökben						
Szuperkapacitások	20 kJ	5,55 Wh/kg	20s [2]	570000 [2]	86 [2]	>10000 [1]

- [1]. Hagyományos és megújuló energiák – Sembery Péter, Tóth László  
 [2]. <http://www.vet.bme.hu>  
 [3]. <http://www.energiaporta.hu>

## 5. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

### 5.1. A mechanikai energia formájában történő energiátárolási lehetőségek eredményeinek analízise:

#### 5.1.1. Szivattyús-tározós-erőmű:

A számolás alapján a következő adatokat vettem melyek, ha teljesülnek a táblázatban feltüntetett eredményeket kapjuk:

- A felső víztározó méretei:
  - Hossz: 200 m
  - Szélesség: 200 m
  - Mélység: 4 m
  - Tengerszint feletti magasság: 50 m

Amennyiben ezek a hely geomorfológiai adottságainak köszönhetően teljesülnek a felső víztározó térfogatát a következő egyenlet megoldásával kaphatjuk meg:

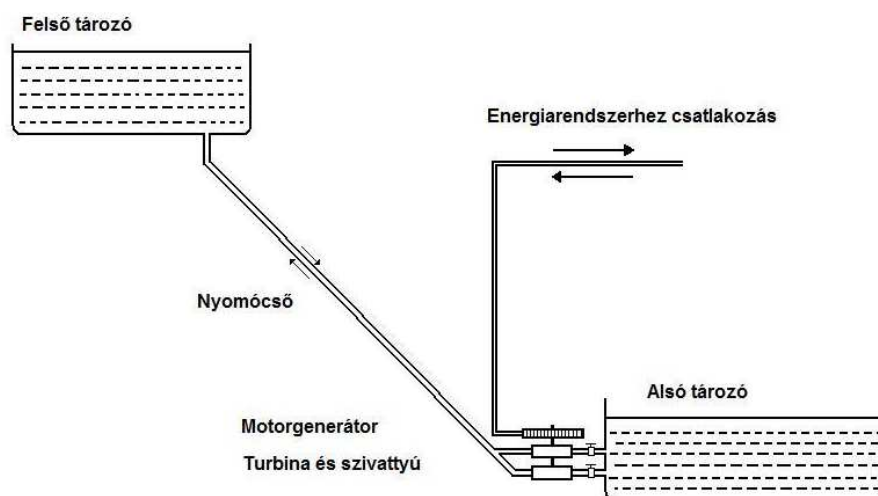
$$V = a \cdot b \cdot c = 200\text{m} \cdot 200\text{m} \cdot 4\text{m} = 160000 \text{ m}^3$$

Mivel vízről beszélünk a számolásunk során ezért a következő mértékegységek közötti átváltási lehetőségeket, kell figyelembe venni:

$$1 \text{ m}^3 \rightarrow 1000 \text{ dm}^3 \rightarrow 1000 \text{ l} \rightarrow 1000 \text{ kg}$$

$$160000 \text{ m}^3 \rightarrow 160000 \text{ tonna}$$

A felső víztározóba felszivattyúzható víz tömege 160000 tonna.



5.1. ábra. Szivattyús-tározós-erőmű elvi vázlata

Amennyiben a felső víztározó 50 m tengerszint feletti magasságából ezt a 160000 tonna vizet a turbinára engedjük a energia nyerhető melynek nagysága:

$$E = m \cdot g \cdot h = 160000 \text{ t} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 50 \text{ m} = 80000000 \text{ kJ}$$

$$80000000 \text{ kJ} \rightarrow 80000 \text{ MJ} \rightarrow 80 \text{ GJ}$$

Tehát amennyiben teljesülnek a geomorfológiai feltételek 80 GJ energiát nyerhetünk egy ilyen szivattyús-tározós-erőmű telepítésével.

A fajlagos energiakapacitása a víznek melyet 50 m szintkülönbségből engedünk le:

$$E = m \cdot g \cdot h = 1 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 50 \text{ m} = \mathbf{500 \text{ J/kg}}$$

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ kWh} & \rightarrow 3,6 \text{ MJ} \\ x & \rightarrow 0,00005 \text{ MJ} \end{array}$$

$$x = (0,00005 \text{ MJ} \cdot 1 \text{ kWh}) / 3,6 \text{ MJ} = \mathbf{1,38 \cdot 10^{-4} \text{ kWh}}$$

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ kWh} & \rightarrow 1000 \text{ Wh} \\ 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ kWh} & \rightarrow 0,138 \text{ Wh} \end{array}$$

Ha az előző feltételek rendelkezésünkre állnak és üzemidőként 8 órával számolunk a következő teljesítmény értéket, kapjuk:

$$\begin{array}{l} 1 \text{ h} \rightarrow 3600 \text{ s} \\ 8 \text{ h} \rightarrow 28800 \text{ s} \end{array}$$

$$P = W/t = 80000 \text{ MJ} / 28800 \text{ s} = \mathbf{2,77 \text{ MW}}$$

### 5.1.2. Sűrített levegő:

A következő képlettel számíthatjuk ki a sűrített levegő maximális energiakapacitását:

$$W_{\max} = RT/M$$

$$\begin{array}{ll} R & \rightarrow \text{Egyetemes gázállandó } 8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \\ T & \rightarrow \text{Hőmérséklet [K]} \\ M & \rightarrow \text{Moláris tömeg [g/mol]} \end{array}$$

A levegő összetételét ismerve könnyen meghatározható a moláris tömege, számításomhoz csupán csak a négy fő összetevő értékeit vettem számításba:

$$M_{\text{levegő}} = 0,781 \cdot 28,013 \text{ g/mol} + 0,209 \cdot 31,999 \text{ g/mol} + 0,009 \cdot 39,948 \text{ g/mol} + 0,0003 \cdot 44,010 \text{ g/mol} = 28,96 \text{ g/mol}$$

$$W_{\max} = RT/M = (0,008314 \text{ [kJ/mol} \cdot \text{K]} \cdot 298,15 \text{ [K]}) / 0,02896 \text{ [kg/mol]} = \mathbf{85,5945 \text{ kJ/kg}}$$

Energiasűrűség meghatározása:

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ kWh} & \rightarrow 3,6 \text{ MJ} \\ x & \rightarrow 0,8559 \text{ MJ} \end{array}$$



$$x = (0,8559 \cdot 1) / 3,6 = \mathbf{0,2377 \text{ kWh/kg}}$$

Amennyiben a következő térfogat és nyomás adatok állnak rendelkezésünkre a fajlagos energiakapacitás és teljesítmény adatok a következőképpen származtathatók:

- V térfogat → 100 m<sup>3</sup>
- p nyomás → 100 bar

$$\begin{array}{lclcl} 1 \text{ bar} & \rightarrow & 100000 \text{ Pa} & \rightarrow & 100 \text{ kPa} \\ 100 \text{ bar} & \rightarrow & 10000000 \text{ Pa} & \rightarrow & 10000 \text{ kPa} \end{array}$$

A nyomás és térfogat feltételek teljesülése mellett a következőképpen származtathatjuk az energia mennyiségét:

$$E = p \cdot dV = 100 \text{ m}^3 \cdot 10000 \text{ kPa} = 1000000 \text{ kJ} = \mathbf{1000 \text{ MJ}}$$

Ahogy az előző számítások esetén is, ha az üzemidőnek 8 órát választunk a teljesítmény a következők szerint, adódik:

$$P = W/t = 1000 \text{ MJ} / 28800 \text{ s} = 0,03472 \text{ MW} = \mathbf{34,72 \text{ kW}}$$

A levegő sűrűsége 25 C°-on 1,184 kg/m<sup>3</sup>.

A levegő tömegének meghatározása:

$$m = V \cdot p \cdot \rho = 100 \text{ m}^3 \cdot 100 \text{ bar} \cdot 1,184 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{11840 \text{ kg}}$$

A levegő fajlagos energiakapacitásának meghatározása:

$$E = (1000000 \text{ kJ} / 11840 \text{ kg}) \cdot 1000 = 84459,4594 \text{ J/kg} = \mathbf{84,4594 \text{ kJ/kg}}$$

### 5.1.3. Lendkerék:

A mozgási energia lendkerékben történő tárolását a következő egyenlettel jellemezhetjük:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \Theta \cdot \omega^2$$

$\Theta$  → Tehetetlenségi nyomaték [kg m<sup>2</sup>]

$\omega$  → Szögsebesség [1/s]

Kiindulási adatok a számoláshoz:

- Lendkerék tömege 10000 kg = 10 tonna
- Frekvenciája f = 50 Hz
- Sugara r = 1 m

A szögsebességet körfrekvenciaként is említhetjük ezért a következő képlet szerint számolhatjuk:

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ 1/s}$$

$$\omega^2 = (314 \text{ 1/s})^2 = 98596 \text{ 1/s}$$

A tehetetlenségi nyomaték kiszámítása a következő egyenlettel lehetséges:

$$\Theta = \frac{1}{2} * m * r^2$$

$$\Theta = \frac{1}{2} * 10000 \text{ kg} * 1^2 \text{ m} = 5000 \text{ kgm}^2$$

$$W = \frac{1}{2} * \Theta * \omega^2 = \frac{1}{2} * 5000 \text{ kgm}^2 * 98596 \text{ 1/s} = 246490000 \text{ J} = 246490 \text{ kJ} = \mathbf{246,49 \text{ MJ}}$$

Ha üzemidőnek 1 órát veszünk, akkor a teljesítmény:

$$P = W / t = 246,49 \text{ MJ} / 3600 \text{ s} = \mathbf{0,0684 \text{ MW}}$$

A lendkerék fajlagos energiakapacitásának meghatározása:

$$E_{\text{fajlagos}} = W / m = 246490000 \text{ J} / 10000 \text{ kg} = \mathbf{24649 \text{ J/kg}}$$

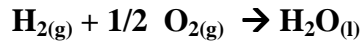
Energiasűrűség meghatározása:

$$E = (0,024 \text{ MJ} * 1) / 3,6 \text{ kWh} = \mathbf{0,0066 \text{ kWh}}$$

## 5.2. A kémiai kötés formájában történő energiátárolási módszerek eredményeinek analízise:

### 5.2.1. Vízbontás hidrogénre:

A víz elektrolízis során történő felbontását a következő reakcióegyenlettel írhatjuk fel, mely szerint egy mol mennyiségű hidrogénből 1 mol víz képződik:



Számítás:

Minél magasabb hőmérsékleten zajlik az oxigén és a hidrogén egyesülése a Gibbs-energia annál kisebb, melyet a következő képlet szerint származtathatjuk:

$$\Delta G^\circ = -2FE^\circ$$

$\Delta G^\circ \rightarrow$  a víz képződésének szabadentalpia változása [J/mol]

$F \rightarrow$  Faraday állandó [96487 C/mol]

$E^\circ \rightarrow$  Víz bomlásfeszültsége [V]

A víz bomlásfeszültsége 25 C°-on 1,23V, 100C°-on pedig 1,1662V ugyanis a hőmérsékleti tényező -85 mV/K.

A számításokat úgy végeztem, hogy 1000 mol hidrogént vettem alapul:

$$M_{\text{Hidrogén}} = 1,00797 \text{ g/mol}$$

1 mol hidrogén tömege 1,00797 g

1000 mol  $\rightarrow$  x

$$x = (1000 * 1,00797) / 1 = 1007,97 \text{ g}$$

1000 mol hidrogén tömege 1007,97 g. Ezen mennyiség energiátárolási kapacitása a következők szerint számítható 25 C° és 100 C° esetén:

$$Q = (2 \cdot 96487 \cdot 1007,97) / (2 \cdot 3600) = 194512002,78 / 7200 = 27015,5559 \text{ Ah/kg}$$

$$w_{25C^\circ} = Q \cdot E^\circ = 27015,5559 \text{ Ah/kg} \cdot 1,23 \text{ V} = 33229,13376 \text{ Wh/kg} = 33,2291 \text{ kWh/kg} = 33,2291 \text{ kJ/s} \cdot 3600 \text{ s/kg} = 119624,76 \text{ kJ/kg}$$

A fajlagos energiakapacitás 25 C°-on:

$$\begin{array}{ll} 1007,97\text{g} & \rightarrow 33,2291 \text{ kWh/kg} \\ 1000\text{g} & \rightarrow x \end{array}$$

$$x = (1000 \cdot 33,2291) / 1007,97 = \mathbf{32,9663 \text{ kWh/kg}}$$

A hidrogén fajlagos energiakapacitására 25 C°-on 32,9663 kWh/kg értéket kapunk.

$$P = W/t = 119,624 \text{ MJ} / 3600 \text{ s} = 0,03322 \text{ MW} = \mathbf{33,22 \text{ kW}}$$

Ugyanezeket a számításokat elvégezve 100 C° hőmérsékleten azt kapjuk, hogy:

$$w_{100C^\circ} = Q \cdot E^\circ = 27015,5559 \text{ Ah/kg} \cdot 1,16625 \text{ V} = 31506,8920 \text{ Wh/kg} = 31,5068 \text{ kWh/kg} = 31,5068 \text{ kJ/s} \cdot 3600 \text{ s/kg} = \mathbf{113424,48 \text{ kJ/kg}}$$

A teljesítmény meghatározása 1 óra üzemidő esetén:

100C°-on 1000 mol hidrogén által tárolt energia mennyisége az előző számolás alapján: 113424,48 kJ/kg.

A fajlagos energiakapacitás 100C°-on:

$$\begin{array}{ll} 1007,97 \text{ g} & \rightarrow 31,5068 \text{ kWh/kg} \\ 1000 \text{ g} & \rightarrow x \end{array}$$

$$x = (1000 \cdot 31,5068) / 1007,97 = \mathbf{31,2576 \text{ kWh/kg}}$$

A hidrogén fajlagos energiakapacitása 100C°-on 31,2576 kWh/kg mely megfelel a hidrogén alapú üzemanyag-cellák fajlagos energiakapacitásának.

Teljesítmény kiszámítása amennyiben üzemidőnek 1 órát számolunk:

$$P = W/t = 113,4244 \text{ MJ} / 3600 \text{ s} = 0,031506 \text{ MW} = \mathbf{31,506 \text{ kW}}$$

### 5.2.2. Metanol előállítás:

A következő számolással lehet szemléltetni a metanol (CH<sub>3</sub>OH) által tárolt energia mennyiségét:

$$Q = m \cdot L$$

m → metanol tömege [kg]  
L → metanol égéshője 22317 [kJ/kg]

A számítás során ahogy a hidrogén esetében is 1000 mol mennyiséget vettem alapul.

Számolás:

$$M_{\text{metanol}} = 32,04 \text{ g/mol}$$

1 mol → 32,04 g  
1000 mol → x

$$x = (1000 \cdot 32,04) / 1 = 32040 \text{ g} = 32,04 \text{ kg}$$

$$Q = m \cdot L = 32,04 \text{ kg} \cdot 22317 \text{ kJ/kg} = 715036,68 \text{ kJ} = \mathbf{715,03668 \text{ MJ}}$$

1 kWh → 3,6 MJ  
x → 715,03668 MJ

$$x = (715,03668 \cdot 1) / 3,6 = 198,6213 \text{ kWh}$$

Fajlagos energiatárolási kapacitás:

198,6213 kWh → 32,04 kg  
x → 1 kg

$$x = (198,6213 \cdot 1) / 32,04 = \mathbf{6,1991 \text{ kWh/kg}}$$
 a metanol fajlagos energiatárolási kapacitása.

$$P = W/t = 715,03668 \text{ MJ} / 3600 \text{ s} = 0,1986 \text{ MW} = \mathbf{198,6 \text{ kW}}$$

### 5.2.3. Akkumulátorok:

#### 5.2.3.1. Ólom-akkumulátor:

A számoláshoz egy 12V-os, 60Ah nagyságrendű 20 kg tömegű ólom-akkumulátort vettem alapul mely értékeket a következő képletbe behelyettesítve megkaptam az akkumulátor által tárolni képes energia nagyságát:

$$E = Q \cdot U$$

U → Feszültség [V]  
Q → Töltésmennyiség [Ah]

1 Ah → 3600 As  
60 Ah → 216000 As

$$E_{\text{összes}} = 216000 \text{ As} \cdot 12 \text{ V} = 2592000 \text{ J} = 2592 \text{ kJ} = \mathbf{2,592 \text{ MJ}}$$

1 kWh → 3,6 MJ  
x → 2,592 MJ

$$x = (2,592 \cdot 1) / 3,6 = 0,72 \text{ kWh} = \mathbf{720 \text{ Wh}}$$

Az ólom-akkumulátorból kivehető energia nagysága:

$$E_{1/2} = E_{\text{összes}}/2 = 1296000 \text{ J} = 1296 \text{ kJ} = \mathbf{1,296 \text{ MJ}}$$

Ha az üzemidő 1 óra, azaz 3600 s akkor a teljesítmény:

$$P = W/t = 1296 \text{ kJ} / 3600 \text{ s} = \mathbf{0,36 \text{ kW}}$$

Ólom-akkumulátor fajlagos energiakapacitásának meghatározása:

$$E_{\text{fajlagos}} = E_{\text{összes}} / m = 2592000 \text{ J} / 20 \text{ kg} = \mathbf{129600 \text{ J/kg}}$$

### 5.2.3.2. Lítium-akkumulátor:

E típus kiértékeléséhez egy 0,2 kg tömegű 1,5 Ah töltésmennyiségű és 4 V feszültségű akkumulátort vettem alapul. Ahogy az előbbiekben az ólom-akkumulátor esetében itt is ezekből az adatokból indulunk ki:

$$1,5 \text{ Ah} \rightarrow 5400 \text{ As}$$

$$E_{\text{összes}} = 5400 \text{ As} * 4 \text{ V} = 21600 \text{ J} = \mathbf{21,6 \text{ kJ}}$$

$$1 \text{ kWh} \rightarrow 3,6 \text{ MJ}$$

$$x \rightarrow 0,0216 \text{ MJ}$$

$$x = (1 \text{ kWh} * 0,0216 \text{ MJ}) / 3,6 \text{ MJ} = 6 * 10^{-3} \text{ kWh} = \mathbf{6 \text{ Wh}}$$

A lítium-akkumulátorból kinyerhető energia nagysága:

$$E_{1/2} = E_{\text{összes}}/2 = 10800 \text{ J} = \mathbf{10,8 \text{ kJ}} = 0,0108 \text{ MJ}$$

Amennyiben az üzemidő 1 h  $\rightarrow$  3600 s akkor a teljesítmény:

$$P = E_{\text{kivehető}}/t = 10,8 \text{ kJ} / 3600 \text{ s} = \mathbf{3 * 10^{-3} \text{ kW}}$$

Lítium-akkumulátor fajlagos-energiakapacitásának meghatározása:

$$E_{\text{fajlagos}} = E_{\text{összes}} / m = 21600 \text{ J} / 0,2 \text{ kg} = \mathbf{108000 \text{ J/kg}}$$

## 5.3 Az elektromos eszközökben, szuperkapacitásokban történő energiatárolás eredményeinek analízise:

### 5.3.1. Szuperkapacitások:

A szuperkapacitásokról, mint kondenzátorokról beszélhetünk az általuk tárolt maximális energiához, jutunk a következő egyenlet kiszámításával:

$$W = 1/2 CU^2$$

W → Elektromos mező energiája [J]  
C → Kapacitás [Farad]  
U → Névleges feszültség [V]

Primer adatok a számításához:

- Szuperkondenzátor tömege  $m = 1 \text{ kg}$
- Kapacitás  $C = 1 \text{ F}$
- Feszültség  $U = 200 \text{ V}$

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 200^2 = 20000 \text{ J} = \mathbf{20 \text{ kJ}} = 0,02 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ kWh} \quad \rightarrow \quad 3,6 \text{ MJ}$$

$$x \quad \rightarrow \quad 0,02 \text{ MJ}$$

$x = (0,02 \text{ MJ} \cdot 1 \text{ kWh}) / 3,6 \text{ MJ} = 5,55 \cdot 10^{-3} \text{ kWh} = \mathbf{5,55 \text{ Wh}}$  azonban ez az érték kiküszöbölhető illetve növelhető a kondenzátorok sorba kapcsolásával.

Akkumulátorok illetve kondenzátorok esetében a teljes energia nem vehető ki a cellákból ezért a kapott értékek felével számolhatunk e technológia esetén. A kivehető energia nagysága:

$$W_{1/2} = 20000 \text{ J} / 2 = 10000 \text{ J} = \mathbf{10 \text{ kJ}}$$

Ha az üzemidőnek 20 percet veszünk, akkor a technológiával elérhető teljesítmény:

$$20 \text{ perc} \quad \rightarrow \quad 1200 \text{ s}$$

$$P = W/t = 10000 \text{ J} / 1200 \text{ s} = \mathbf{8,33 \text{ kW}}$$

Fajlagos energiakapacitás meghatározása:

$$E = E_{\text{össz}} / m = \mathbf{20000 \text{ J/kg}}$$

#### 5.4. Tárolási módszerek összehasonlítása

Különböző műszaki, fizikai, gazdasági vagy akár kémiai tényezők szerint hasonlíthatjuk össze ezeket az energiatárolási módszereket. Ilyen összehasonlítási módszereknek tekinthetők:

- Fajlagos energiakapacitás [J/kg]
- Eredő hatásfok [%]
- Teljesítmény [MW]
- Energiatárolás mennyisége [MJ]
- Tárolási idő [s, h...]
- Energiasűrűség [kWh/kg]

A szél szakaszos rendelkezésre állása miatt a szél turbinák által termelt villamos energia hálózatra kapcsolása az elektromos hálózat stabilitását zavarja. A szél sebességének néhány napra történő megváltozása az időjárási frontok átvonulásának eredménye (synoptic peak). Azonban nem csak ezt a zavart kell kiküszöbölni a szélenergia tárolásával, hanem azt is, mikor napi szinten is jelentős változások történnek a szél sebességében (diurnal peak). Ez a napi szinten történő változás a turbulencia hatásának tudható be. Az energiatárolás szempontjából ezeknek a szélesebbé válásoknak jelentős a szerepe ugyanis nem mindegy mekkora tárolási idő kapacitással rendelkezik az adott energiatárolási módszer, illetve, hogy a szélesebbé ingadozásakor milyen gyorsan indítható az adott technológia. A 3.6. pont alatt szerepeltetett

táblázat adataiból kitűnik, hogy a néhány nap időtartamra kiterjedő szélsőbesség változások általi zavar kiküszöbölésére legalkalmasabbnak a hidrogénalapú üzemanyagcella bizonyul, amely 3h - 4 hónap időtartamot ölel át. A napi szinten történő zavarások elkerülése érdekében melyek a turbulenciáknak köszönhetőek, azonban már más technológia bizonyul a legoptimálisabbnak ugyanezen 3.6. pontban feltüntetett táblázat adataiból kiindulva. Ebben az esetben a lendkeres energiátárolási módszer bizonyul a legmegfelelőbbnek, ugyanis ez a technológia 20 másodperc – 20 perc időspektrumot ölel át a tárolási idő tekintetében, mely elegendő a zavar elkerülésére.

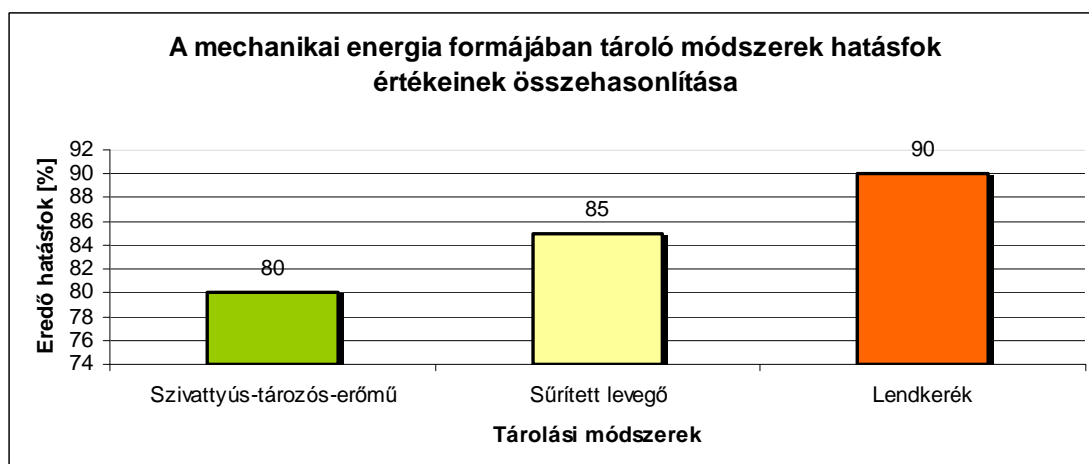
A villamos energiátárolás gazdasági előnyökkel is jár, ugyanis éjszaka, amikor olcsóbb az áram a szélenergia termelt energiát éppen optimális energiátárolási módszer által tárolódik és csúcsidejében mikor a fogyasztóknak szüksége, van rá magasabb áron eladható.

A könnyebb áttekintés céljából a következő táblázat az összehasonlítható módszerek adatait tartalmazza, azon energiátárolási módszerek esetén melyek az energiát mechanikai energia formájában tárolják:

5.1. táblázat. A mechanikai energia formájában tároló módszerek műszaki adatai

Energiátárolás mechanikai energia formájában					
Módszerek	Energiasűrűség [kWh/kg]	Teljesítmény [kW]	Energiátárolás mennyisége [MJ]	Eredő hatásfok [%]	Fajlagos energiakapacitás [kJ/kg]
Szivattyús-tározós-erőmű	$1,38 \cdot 10^{-4}$	2770	80000	80	0,5
Sűrített levegő	0,2377	34,72	1000	85	84,459
Lendkerék	0,0066	68,4	246,49	90	24,649

A táblázat adataiból illetve a következő diagrammon is jól látható, hogy ezek a mechanikai energia formájában tároló módszerek mindegyike meglehetősen magas eredő hatásfok értékekkel rendelkezik, azonban egyik sem bír 100%-os hatásfokkal. Ez a hatásfokcsökkenés arra vezethető vissza, hogy a villamos energiát a tárolási módszerek nagy része más-más energiaformára alakítja át tárolás céljából és ez a tárolt energia újra átalakításra, kerül mikor villamos energiára, van szükség. Ez az oda-vissza történő átalakítás energiaveszteséggel jár, méghozzá az „ingyen” rendelkezésünkre álló szélenergia veszteségével. A következő diagram szemlélteti a mechanikai energia formájában tároló módszerek eredő hatásfok értékeit:

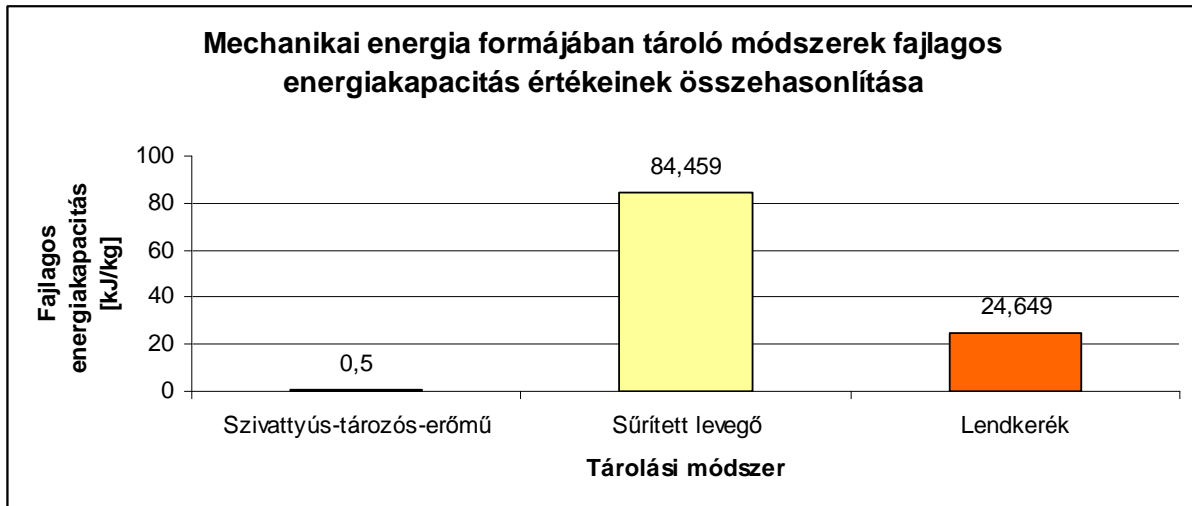


5.2. ábra. A mechanikai energia formájában tároló módszerek hatásfok értékeinek összehasonlítására szolgáló diagramm

Jól látható, hogy számottevő különbségről a technológiák tekintetében nem beszélhetünk, azonban a lendkeres energiátárolási technika jár a legkevesebb veszteséggel. Ez a

meglehetősen magas eredő hatásfok érték a technológia fejlődésének köszönhető ugyanis a léghellenállás kiküszöbölése érdekében vákuumban forgatják a lendkereket, illetve a csapágy súrlódásából fakadó veszteség elkerülése miatt elektromágneses lebegtetésű csapágyakat alkalmaznak.

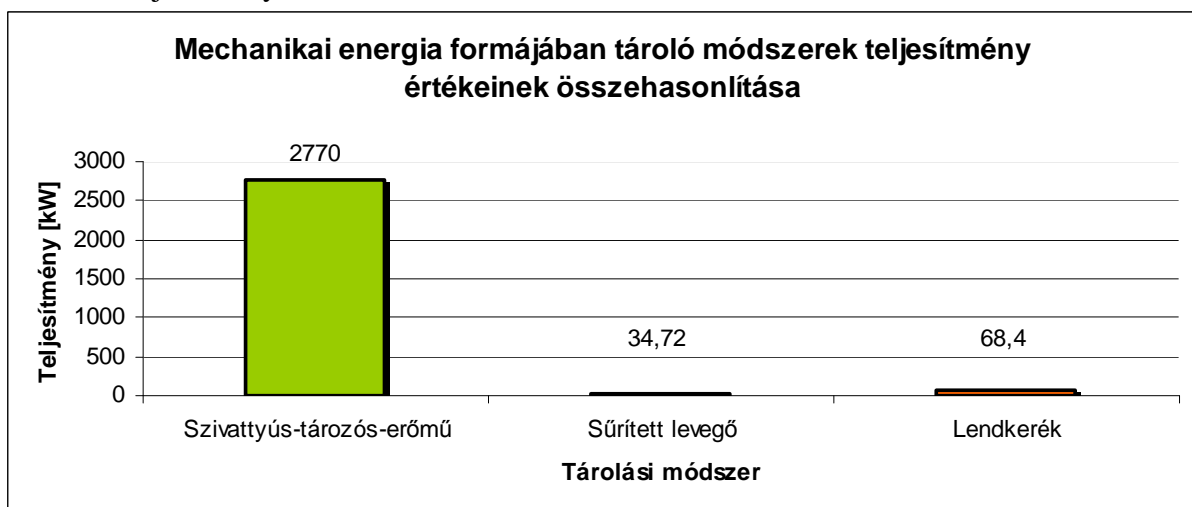
Ugyanezeknek a tárolási módszereknek a fajlagos energiakapacitás értékeit hasonlítja össze a következő diagramm:



5.3 ábra. Mechanikai energia formájában tároló módszerek fajlagos energiakapacitás értékeit összehasonlító diagramm

Kitűnik, hogy a sűrített levegő fajlagos energiakapacitás értéke jóval meghaladja a két másik módszer értékeit. Ezt a konkrét értéket sűrített levegőben való tárolás esetén kapjuk, ugyanis minél kisebb a sűrített gáz moláris tömege annál nagyobb fajlagos energiával rendelkezik. Hidrogén esetén ez az érték nagyságrendekkel magasabb, mint levegő esetében. Szivattyús-tározós-erőművek esetében ez az érték nem bír nagy jelentőséggel, ugyanis egy ilyen erőmű energiakapacitása a felső víztározó nagyságától függ melyben több százezer tonnának megfelelő vízmennyiség tárolható.

A következő diagramm segítségével összehasonlíthatjuk mechanikai energiaként tároló módszerek teljesítmény értékeit:

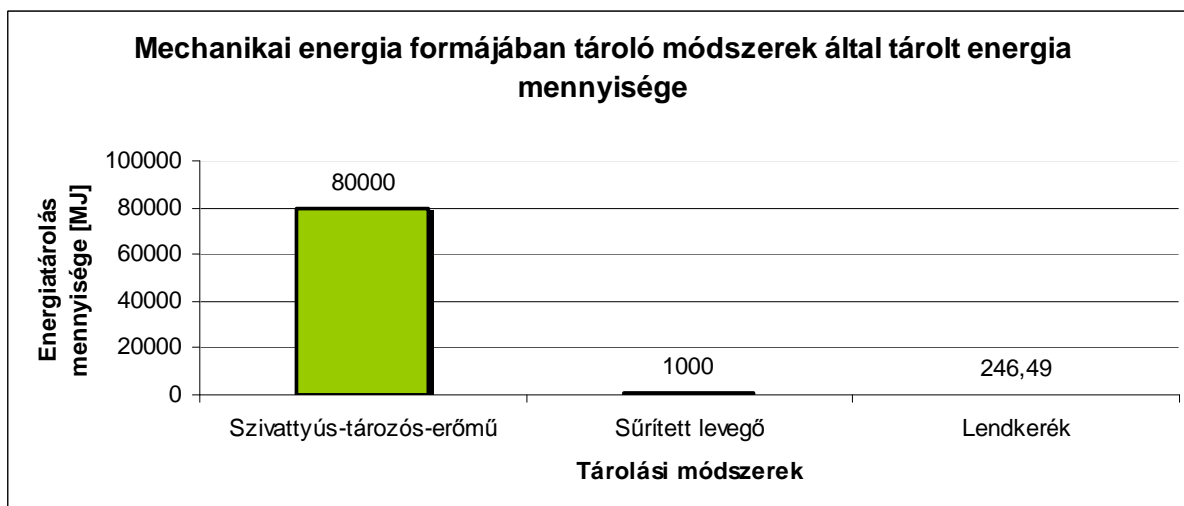


5.4. ábra. Mechanikai energia formájában tároló módszerek teljesítmény értékeit összehasonlító diagramm



A szivattyús-tározós-erőmű teljesítménye az 5.1.1.-ben foglaltaknak mérve rendelkezik ekkora értékekkel, azonban megfelelő geomorfológiai adottságok mellett a példában vett erőmű még nagyságrendekkel bővíthető. Elmondhatjuk, hogy teljesítmény tekintetében ez a lehetőség bizonyul a legoptimálisabbnak.

Az energiatárolási módszerek összehasonlításának lehetséges módszerei közé sorolhatjuk még a tárolt energia mennyiségét, amelyet a következő diagram szemléltet:



5.4. ábra. Mechanikai energia formájában tároló módszerek által tárolt energia mennyiségének összehasonlítását ábrázoló diagramm

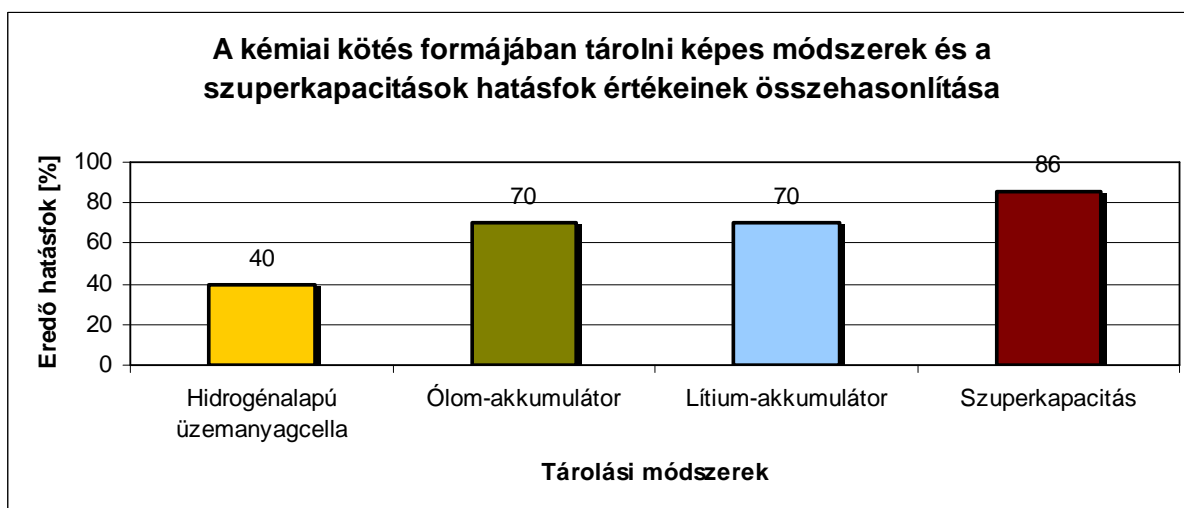
Ahogy az előző diagramm esetében is, itt is elmondható, hogy ez a nagyságrendbeli különbség a szivattyús-tározós-erőművek javára az 5.1.1. pontban rögzített feltételek teljesülése esetén lehetséges. Ugyanez a feltétel vonatkozik a sűrített levegő általi, illetve a lendkerekes energiatárolásra.

Az 5.2. táblázat a kémiai kötés formájában történő energiatárolási módszerek illetve a szuperkapacitásokra jellemző értékeket tartalmazza:

5.2. táblázat. Kémiai kötés formájában tároló módszerek és a szuperkapacitások műszaki adatai

Energiatárolás kémiai kötés formájában és szuperkapacitásban					
Módszerek	Energiasűrűség [kWh/kg], [Wh/kg]	Teljesítmény [kW]	Energiatárolás mennyisége [MJ]	Eredő hatásfok [%]	Fajlagos energiakapacitás [kJ/kg]
Vízbontás hidrogénre	32,9663 kWh/kg	33,22	119,6		
Metanol előállítás	6,1991 kWh/kg	198,6	715		
Hidrogénalapú üzemanyagcella	31,2576 kWh/kg	31,506	113,4	40	
Ólom-akkumulátor	36 Wh/kg	0,36	1,296	70	129,6
Lítium-akkumulátor	30 Wh/kg	0,003	0,0108	70	108
Szuperkapacitás	5,55 Wh/kg	8,33	0,02	86	20

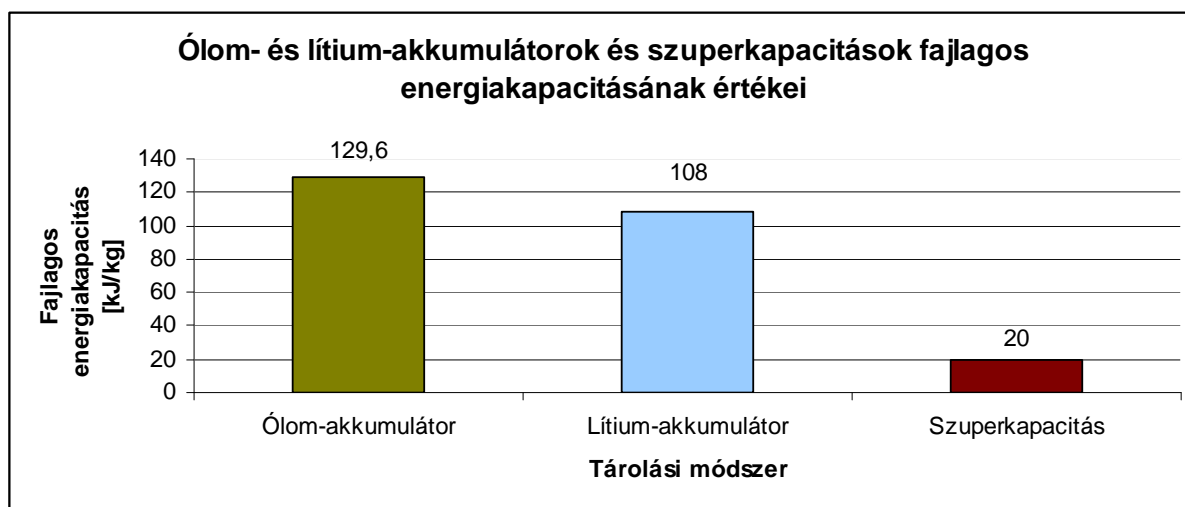
A következő 5.5. diagramm a kémiai kötésként tároló módszerek, és a szuperkapacitások hatásfok értékeit mutatja:



5.5. ábra Kémiai kötés formájában tároló módszerek és szuperkapacitások eredő hatásfok értékeinek összehasonlítása

A diagrammon jól látható, hogy az előző pontban tárgyalt mechanikai energia formájában tároló módszerektől e metódusok elmaradnak az eredő hatásfok tekintetében. Azonban ez nem igaz a szuperkapacitásokra melyek közvetlenül a villamos energiát tárolják. A hidrogénalapú üzemanyagcella jelentősen elmarad az eddig taglalt energiátárolási módszerektől, azonban ezt kompenzálja energiasűrűsége mely nagyságrendekkel magasabb a többinél.

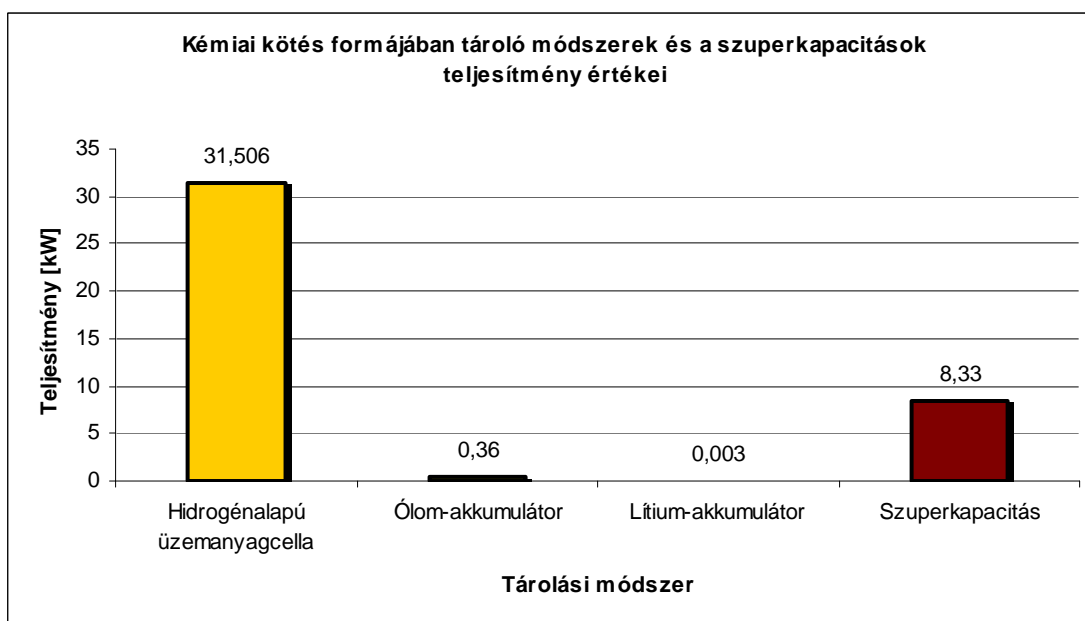
Az 5.6. számú diagramm szemlélteti a fajlagos energiakapacitás értékeket az ólom- és lítium-akkumulátorok, illetve a szuperkapacitások kapcsán:



5.6. ábra. Az ólom- és lítium-akkumulátorok illetve szuperkondenzátorok fajlagos energiakapacitás értékeinek összehasonlítására szolgáló diagramm

A kémiai kötés formájában tároló módszerek fajlagos energiakapacitás értékei jóval meghaladják mind a mechanikai energia formájában tároló módszerek mind a közvetlenül villamos energiát tároló szuperkondenzátorok fajlagos energiakapacitását.

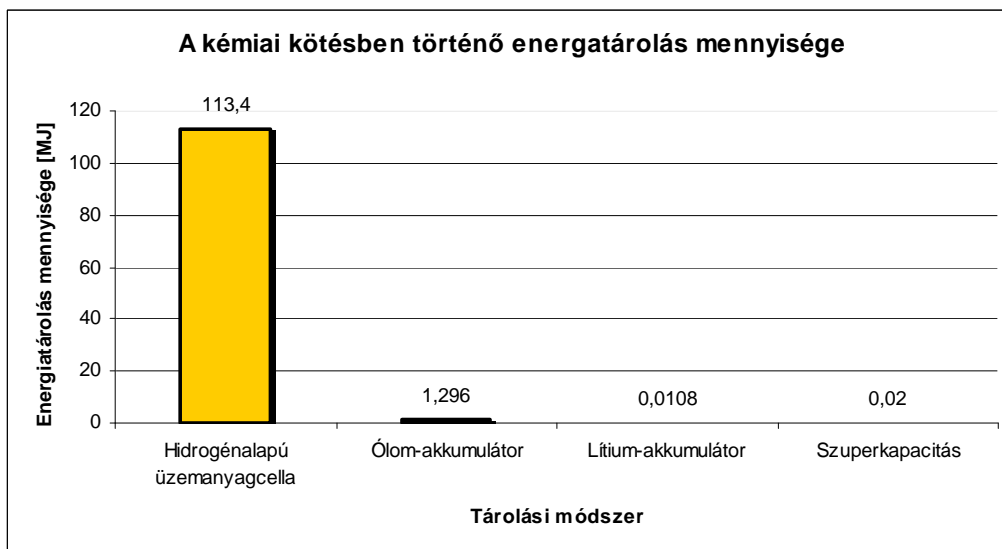
A teljesítmény adatok összehasonlítását mutatja a következő 5.7. diagramm:



5.7. ábra. Kémiai kötés formájában tároló módszerek és szuperkapacitások teljesítmény értékeinek összehasonlítása

A hidrogénalapú üzemanyagcella teljesítmény értékei jóval meghaladja az akkumulátorok, illetve a szuperkapacitások által biztosított teljesítmény értékeket.

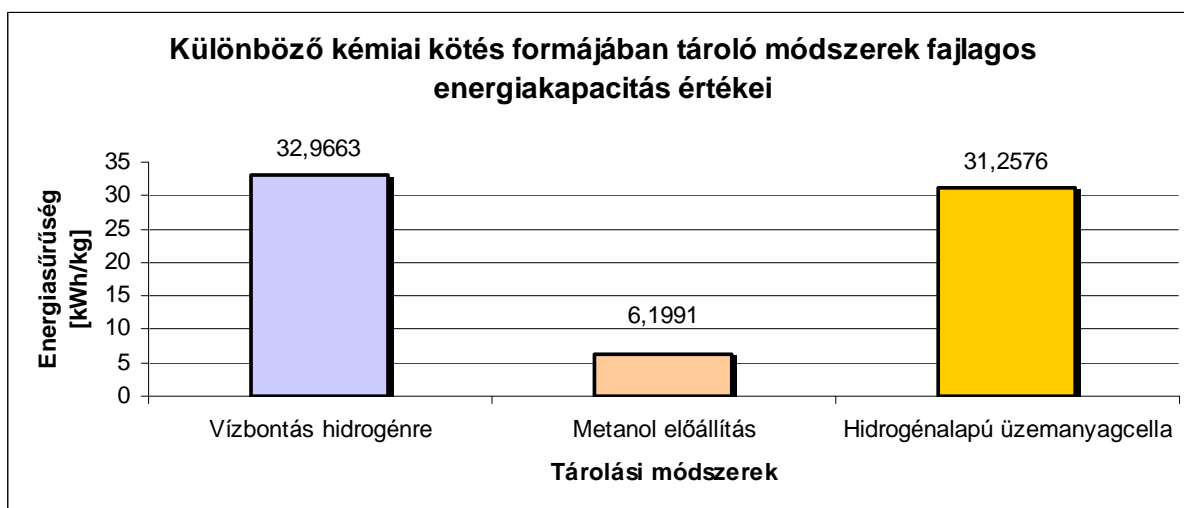
Az 5.8. számú diagramm mutatja a kémiai kötésben tároló módszerek által tárolt energia mennyiségét:



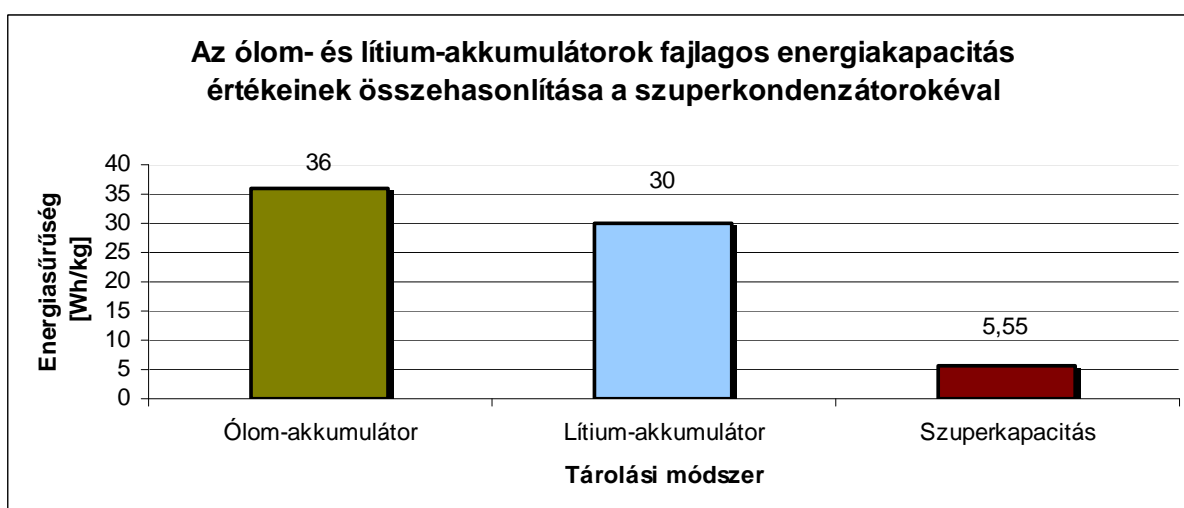
5.8. ábra. Kémiai kötésben történő energiatárolás mennyiségének összehasonlítása

Mint ahogy a diagrammról is leolvasható a legnagyobb mennyiségű energia tárolására a hidrogénalapú üzemanyagcella képes.

Kémiai kötés formájában tároló módszerek, és a szuperkondenzátorok energiasűrűségének összehasonlítását mutatja a következő 5.9. illetve az 5.10. diagramm:



5.9. ábra. Hidrogén, metanol és a hidrogénalapú tüzelőanyagcellák energiasűrűség értékeinek összehasonlítása



5.10. ábra. Ólom- és lítium akkumulátorok és szuperkapacitások energiasűrűség értékeinek összehasonlítása

Nagyságrendbeli különbségek vannak a hidrogén, illetve a metanol és az ezeket felhasználó üzemanyagcellák javára az akkumulátorok és a szuperkapacitások energiasűrűség értékeihez képest valamint a mechanikai energia formájában tároló módszerek értékei is jóval elmaradnak azoktól.

A diagrammok illetve a táblázatok adataiból összegzésként elmondható, hogy a mechanikai energia formájában tároló módszerek közül a legoptimálisabb a szivattyús-tározós erőművek telepítése lenne, ugyanakkor a kémiai kötés formájában tároló módszerek közül a hidrogén alapú üzemanyagcella mutatkozik legkiválóbb választásnak. Az utóbbinak azonban az a hátránya a hatalmas befektetési költségek mellett, hogy a hidrogén tárolása, szállítása gázhalmazállapotban robbanásveszélyes. Folyékony halmazállapotba történő átalakításához speciális kriosztátra van szükség, ugyanis cseppfolyós hidrogén csak  $-252^{\circ}\text{C}$  alatt létezik. Ez az eszköz is hatalmas költségeket igényel. Környezetvédelmi szempontokat figyelembe véve a hidrogénalapú tüzelőanyag-cella akkor felel meg a követelményeknek, ha tiszta oxigénnel történik az égés ugyanis ekkor melléktermékként vízgőz keletkezik, ha levegő mellett történik a hidrogén égése különböző káros anyagok szabadulnak fel a vízgőz mellett úgymint nitrogén-oxid, nitrogén-dioxid.

A szivattyús-tározós-erőmű mely telepítésére már történtek próbálkozások hazai viszonylatban a Duna-kanyarban, Zempléni-hegységben és a Keszthelyi-hegységben lenne a másik optimális lehetőség, azonban a környezetvédelmi szervezetek, és egyesületek megakadályozták e létesítmények létrehozását, ugyanis a megfelelő geomorfológiával rendelkező helyszínek természetvédelmi területeken helyezkednek el, és egy ilyen tározós erőmű telepítése zavarná a táj esztétikai képét. Ugyanakkor, ha belegondolunk, hogy egy tározós erőmű telepítése által nem csupán 20 %-os hatásfokkal bírnának a szélerőművek, hanem ez az érték jóval megnövekedne, előtérbe kerülnének a megújuló energiaforrások.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A megújuló energiaforrások közül a szelet hasznosító szélerőművek a szél szakaszos rendelkezésre állása miatt zavarják az elektromos hálózat stabilitását. A szakdolgozatom céljaként arra kerestem választ, hogy e probléma kiküszöbölésére milyen megoldások állnak rendelkezésre.

E megoldásnak az energia tárolása bizonyult mely történhet mechanikai energia, kémiai kötés illetve közvetlenül a villamos energia tárolásával. E három csoportba számos energiatárolásra kifejlesztett technológia tartozik melyeket, mint műszaki, mint gazdasági tulajdonságaik alapján hasonlítottam össze és rámutattam a legoptimálisabb lehetőségekre a hazai adottságokat is figyelembe véve.

**A megfelelő számítások elvégzésével, a kapott értékek összehasonlítása után összegezve elmondható, hogy a hazai viszonyokat figyelembe véve két energiatárolási módszer a szivattyús-tározós-erőmű és a hidrogénalapú üzemanyagcella lenne megfelelő a probléma kiküszöbölésére. E két technológia közül bármelyik alkalmazásával elérhető lenne, hogy a szélerőművek magasabb hatásfokkal álljanak rendelkezésünkre ezzel nagyobb szerepet vállalva az energiatermelésben.**

## IRODALOMJEGYZÉK

- Hunyár Mátyás, 2002. A megújuló és környezetbarát energetika villamos gépei és szabályozásuk. Műegyetemi Kiadó, Budapest. p. 43-75.
- Sembery P. & Tóth L., 2004. Hagyományos és megújuló energiák. Szaktudás Kiadó, Budapest. p. 450-500.
- Gööz Lajos, 2007. Energetika jövőidőben. Bessenyei György Könyvkiadó, Nyíregyháza. P. 237-248.
- Vajda György. 2009. Energia és társadalom. MTA Társadalomkutató Központ, Budapest. p. 15-25.
- Vajda György. 2004. Energiaellátás ma és holnap. MTA Társadalomkutató központ, Budapest. p. 78-92.
- Reményi Károly. 2007. Megújuló energiák. Akadémiai Kiadó, Budapest. p. 117-122.
- Verena Fahrion. 2007. In Zukunft Windenergie als Druckluft speichern. Trends und Reports, 5 : 14.
- Wolfner András. 2000. Tüzelőanyag-cellák lakások és kórházak áramellátására. Természet Világa.
- <http://www.diebrennstoffzelle.de/alternativen/wasser/pumpspeicher.shtml> (utolsó megtekintésének az ideje: 2011-04-30)
- <http://idw-online.de/pages/de/news?print=1&id=261941> (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- <http://www.uni-miskolc.hu/~fkmbader/Tudomanyos/Keziratok/Husz.pdf> (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- <http://www.electricitystorage.org/ESA/technologies/> (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- <http://www.oekoenergie-blog.at/tag/erneuerbare-energien/> (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- [http://servian.hu/index.php?lang=hu&option=com\\_content&view=article&id=10011](http://servian.hu/index.php?lang=hu&option=com_content&view=article&id=10011) (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- [http://www.energiacentrum.com/news/a\\_lendkerek\\_kiegyensulyozza\\_az\\_energiarendszert.html](http://www.energiacentrum.com/news/a_lendkerek_kiegyensulyozza_az_energiarendszert.html) (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- <http://www.mernokbazis.hu/cikkek/aram-a-raktarban> (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- <http://peandes.unex.es/archives/P110.pdf> (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- [http://www.omikk.bme.hu/collections/mgi\\_fulltext/trend/2004/10/1006.pdf](http://www.omikk.bme.hu/collections/mgi_fulltext/trend/2004/10/1006.pdf) (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- <http://www.villanyszaklap.hu/cikkek.php?id=1111> (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- <http://www.alternativenergia.hu/kategoriak/temakorok/hidrogen> (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- [http://www.energiaporta.hu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=23%3Aszelenergiatarolasa&catid=4%3Aszelenergia&Itemid=67&lang=hu](http://www.energiaporta.hu/index.php?option=com_content&view=article&id=23%3Aszelenergiatarolasa&catid=4%3Aszelenergia&Itemid=67&lang=hu) (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- [http://www.bmf.hu/conferences/energia2008/14\\_SzetModell.pdf](http://www.bmf.hu/conferences/energia2008/14_SzetModell.pdf) (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- <http://www.vet.bme.hu/okt/msc/vgh/megen/tananyag/Energiatarolas.pdf> (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- <http://www.nyf.hu/others/html/kornyezettud/megujulo/Hidrogen/Hidrogen.html> (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- [http://www.hidrologia.hu/vandorgyules/28/dolgozatok/varga\\_gyorgy6.html](http://www.hidrologia.hu/vandorgyules/28/dolgozatok/varga_gyorgy6.html) (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)
- <http://mindentudas.hu/elodasok-cikkek/item/130-mi-van-a-konnektor-mögött?.html> (utolsó megtekintésének ideje: 2011-04-30)