

PEM tüzelőanyag-cella új anyagtechnológiai áramlási mezővel

PEM Fuel Cell with a flow field used a new material technology

Kereszty Balázs^{a,c,*}, Braun Barnabás^a, Vida Ádám^a, Tompos András^b, Szijjártó Gábor^b

^aBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., ^bEötvös Loránd Kutatási Hálózat,
^cInnovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem
 *Kapcsolattartó: balazs.kereszty@bayzoltan.hu

Kulcsszavak

tüzelőanyag-cella, bipoláris lemez, hidrogén, tervezés és szimuláció, mérés

Absztrakt

Az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások miatt a tüzelőanyag-cellás technológiák napról napra nagyobb teret nyernek. Mivel a témakör még nagyságrendnyi fejlesztési lehetőséget tartogat, így kutatócsoportunk (Bay Zoltán Kutatóközpont PROD divízió, Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Természettudományi Kutatóközpont, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék Neumann János Egyetem) is elindult ezen a területen, egy olyan vízióval, amely világszinten újítás lehet. Az eddigi csatornás gázvezetés helyett egy új, anyagtechnológiai áramlási mezővel valósítottuk meg a gázok membrán-elektroda egyesítésre (MEA - Membrane Electrode Assembly) vezetését. A tervezés során Computational Fluid Dynamics (CFD) szimulációt is készítettünk a várható molekula mozgásokról a mezőn belül. A cella gyártását követően egy tüzelőanyag-cella mérőberendezésen is megvizsgáltuk, hogy életképes-e ez a fajta innovatív megoldás.

Keywords

fuel cell, bipolar plate, hydrogen, design and simulation, investigation

Abstract

Fuel cell technologies are gaining ground day by day due to increasingly stringent environmental regulations. As the topic still is considerable potential for development, our research team (Bay Zoltán Nonprofit Ltd. for Applied Research Division PROD, Eötvös Loránd Research Network the Research Centre for Natural Sciences, Department of Innovative Vehicles and Materials John von Neumann University) has also initiated research in this field with a vision that can be a global innovation. Instead of the general channel gas pipeline, we implemented the piping of the gases to Membrane Electrode Assembly (MEA) with a flow field which uses a new material technology. During the design, we also performed a Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation of the expected molecular movements within the field. After the production of the cell, we also tested the viability of this type of innovative solution on a fuel cell measuring device.

1. Bevezetés

Az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások miatt a tüzelőanyag-cellás technológiák napról napra nagyobb teret nyernek. Mivel a témakör még nagyságrendnyi fejlesztési lehetőséget tartogat, így kutatócsoportunk (Bay Zoltán Kutatóközpont PROD divízió, Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Természettudományi Kutatóközpont, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék Neumann János Egyetem) is elindult ezen a területen egy olyan vízióval, amely világszinten újítás lehet.

Manapság többfajta tüzelőanyag-cellát különböztetünk meg, ezek között a különbség elsősorban a használt elektrolit fajtája, és természetesen a bevezetett reagensek között van (1. ábra).

A PEM típusú cellák között két altípus létezik, a kis hőmérsékleten (LT – Low Temperature; 50-100 °C) és a nagy hőmérsékleten (HT – High Temperature; 120-180 °C) működők. A magasabb üzemi hőmérsékletű cellák előnye, hogy kevésbé érzékenyek a bevezetett gázok szennyezéseire, a hatásfokuk pedig magasabb, ugyanakkor a HT típusú PEM cellák drágábbak és műszaki érettségük nincs olyan szinten, mint az LT változat esetében.

A PEM cellák esetében az alkalmazott elektrolit egy 1,0mm-nél vékonyabb, hidrátált protoncserélő membrán, amely csak a hidrogén-ionokat, azaz a protonokat engedi át, az elektronokat megfogja.

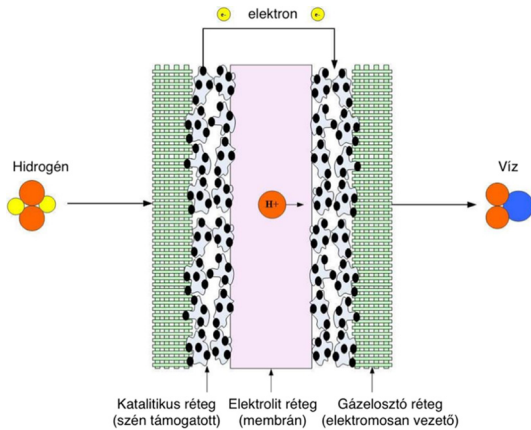
Az aktív felület, a membrán-elektrod egység (MEA) és a gázokat rávezető, illetve a hűtést biztosító bipoláris lemez anyagtechnológiai és gépészeti kialakítása az egész köteg felépítését meghatározza. Az aktív felületen (MEA) történik meg a protoncsere, azaz az energia konverzió,

Típus	Üzemanyag	Elektrolit	Hatás fok	Üzemi hőmérséklet	Felhasználás
PEMFC Protoncsere membrános	Tiszta H ₂ , O ₂ , Levegő	Nafion membrán	55-75%	70-200°C	Járműipar Erőmű
SOFC Szilárd oxidos	H ₂ , Földgáz, Széngáz, Levegő, O ₂	Szilárd cirkónium-oxid	60-65%	600-1100°C	Gőzturbinás erőmű Áramforrás
DMFC Direkt metanolos	Metanol, O ₂ , Levegő	Nafion / MOR membrán	25-35%	80-130°C	Hordozható elektronikai termékek
PAFC Foszforsavas	Tiszta H ₂ , O ₂ , Levegő	Tömény folyékony foszforsav	50-60%	150-210°C	Áramforrás Erőmű
AFC Alkáli elektrolitos	Tiszta H ₂ , O ₂	30%-os kálium-hidroxid oldat	60-70%	<80°C	Járműipar Hadipar Űripár
MCFC Olvadtt karbonátos	H ₂ , Földgáz, Széngáz, Levegő, O ₂	Olvadtt lítium-, nátrium-, és kálium-karbonát	50-60%	>600°C	Gőzturbinás erőmű Áramforrás

1. ábra: Legelterjedtebb tüzelőanyag-cella típusok [5]

amely során a kémiai energiából elektromos energia (esetünkben pontosabban feszültség) lesz.

Hogyan zajlik a folyamat? A membrán mindkét oldalán elhelyeznek egy gázáteresztő réteget – ez a legtöbbször szénpapír –, illetve szintén mindkét oldalát katalizátorral vonják be. A hidrogént és az oxigént (amely a levegőből származik) a membrán két ellentétes oldalán vezetik a cellába. A hidrogénből keletkező hidrogén-ionok áthaladva a membránon, annak másik oldalán az oxigénredukció termékével, az OH⁻-ionokkal vízzé egyesülnek, miközben a leválasztott elektron segítségével elektromos áram jön létre (2. ábra).



2. ábra: Egyszerű PEM cella működése [14]

2. Követelmények meghatározása

Fő célkitűzésünk egy innovatív felépítésű tüzelőanyag-cella köteg létrehozása volt, ami rendelkezik azokkal a kivezetésekkel, mely a fejlesztés szempontjából több fontos paraméter mérésére alkalmasak. A cellánkban használt MEA egységet az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat (ELKH) Természettudományi Kutatóközpont tervezte és kivitelezte.

A gázáramlások szempontjából is fontos elem a cellában használt bipoláris lemez, melynek első változatát szintén az ELKH biztosította. E lemezekről függ, milyen hatékonysággal, és milyen ellenállással jut a MEA egységre a levegő és a hidrogén. Így kutatásunk egyik fő iránya a bipoláris lemezek köré összpontosult.

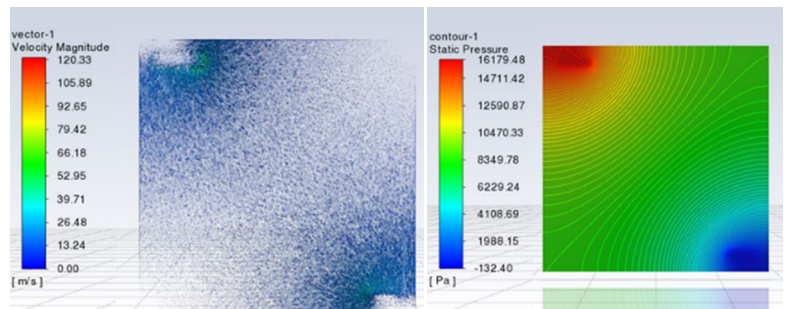
3. Konstruktív tervezés

A PEM cellák tervezésekor elsődleges szempont, hogy a többszöri, gyors be- és kikapcsolásokat, valamint a különböző teljesítmény ingadozásokat egyre jobban, egyre kisebb degradáció mellett tudják biztosítani, melyben a platina katalizátor segít. Sok fejlesztés tárgyát képezi a nemesfém minél kisebb mennyiségű felhasználása, hogy a cellák egyre gazdaságosabbá és versenyképesebbé váljanak. A PEM típusú cellák rendelkeznek továbbá olyan hátrányokkal is, amelyek még megoldásra várnak. A használt katalizátorok például igen érzékenyek bizonyos szennyeződésekre (pl. CO), aminek következtében nagyon tiszta levegő és hidrogén szükséges a membrán számára. A levegőt ezért speciális katalizátorral kell megszűrni, a tiszta hidrogén előállítása pedig költséges. A másik probléma a membrán ideális nedvességének biztosítása, hogy az elektrolit (a membrán) károsodása ne legyen túl nagy, a cella teljesítménye ne csökkenjen túl nagy mértékben a várható élettartam során. Ezeket a cella tulajdonságokat a fejlesztés során vizsgálni szükséges különböző, üzemi körülmények között nem ellenőrzött paraméterek mérésével. Munkánk egy része is ezen módszerek kidolgozására irányul.

A MEA egység 16 cm²-es, 40x40 mm befoglaló méretű. A bipoláris lemez gépészeti szempontból fontos eleme egy tüzelőanyag-cellának, jó elektromos vezetőképességgel



3. ábra: A bipoláris lemez kialakítási koncepciójának fejlődési szakaszai



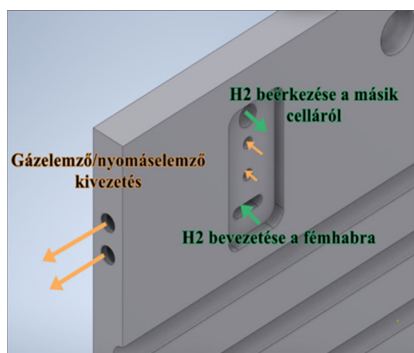
4. ábra: a) H₂ molekulák sebességvektorai [m/s],
b) a statikus nyomás kontúrképe [Pa]

és korrózióállósággal kell rendelkezzen, mert a cellán belüli közeg 2-3 pH értékű, azaz erősen savas kémhatású. A lemez anyagát tekintve mindenféleképpen valamilyen korrózióálló acélból kell gyártani. A hidrogén a periódusos rendszer legkönnyebb eleme, rendkívül kis réseken is képes elszökni, így a cella megfelelő tömítettsége kritikus. A bipoláris lemezek fő funkciója a MEA egységre történő gázvezetés, ugyanakkor elvárt a jó vezetőképesség, a jó hővezetés. Az alacsony gyártási költségek és az egyszerű cellaösszeszerelés miatt fontos a viszonylag egyszerűre tervezett geometria.

Fejlesztésünk fő iránya a gázáramlások optimalizálása a cellán belül, így kidolgoztunk egy bipoláris lemez kialakítást, melyet a 3. ábrán szemléltetünk. Az eddigi PEM tüzelőanyag-cella csatornás gázvezetése helyett, egy egyedi áramlási mezővel valósítottuk meg a gázok MEA-ra vezetését.

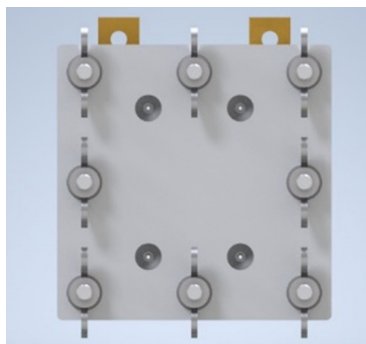
A tervezés során CFD (Computational Fluid Dynamics) szimulációt is készítettünk a várható molekula mozgásokról az egyedi közegen (4. ábra). CFD segítségével végeztük el a numerikus áramlástan modellezést. Eredményként kapott várható sebességvektorok a cellán belüli gázáramlások irányait, a statikus nyomásmező pedig a gázok eloszlását mutatja meg. Az ábra alapján a belépés és kilépés környékén magas, illetve alacsony az eloszlás, ami elfogadható analóg folyamatok esetén, amennyiben az eltérés egy tartományban marad. A saját vízió szerint kialakított cellánkban a nyomásmező alapján a gázeloszlást finomítani kell a jövőben.

A bipoláris lemez konstrukció során nagy hangsúlyt kapott a tömítések megfelelő illeszkedése a hornyokba, illetve az összes, a mérésekhez elengedhetetlen furat és egyéb kivezetés kialakítása (5. ábra).



5. ábra: A gázelemző/nyomáselemző kivezetésének szemléltető ábrája

A cella mérésének kivitelezéséhez szükség van egy áramszedőre. Mivel méréseink során végig egycellás kivitelezéssel dolgoztunk, az áramszedőt mindegyik bipoláris lemez külső oldalán kellett elhelyezni, melyhez a jó elektromos vezetés miatt rézet használtunk. Az áramszedő és a véglemez között elektromos szigetelésre volt szükség, megakadályozva ezzel az áramszedő és a véglemez közvetlen érintkezéséből keletkező rendszer-zárlatot. Az összeszereléshez szükségünk volt továbbá egy-egy véglemezre is, a reagens és oxidálószer be- és elvezetésének csatlakoztatásához, bipoláris lemezekbe továbbításához, illetve a lemezek megfelelő mechanikai rögzítéséhez. A megfelelő tömítettséget Viton/NBR70 anyagú tömítőgyűrűkkel értük el. A konstrukciós tervezési szakaszt követően létrehoztunk egy 3D renderelt modellt (6. ábra) és összeállítottuk az alkatrészlistát.



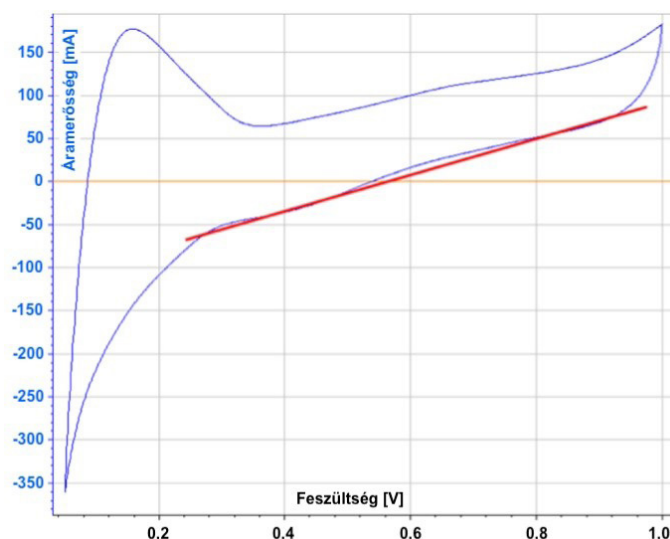
6. ábra: 3D renderelt kép a celláról előnézetben

4. Mérés

A cella gyártását követően az ELKH TTK segítségével egy tüzelőanyag-cella mérőberendezésen is megvizsgáltuk, hogy az általunk vizionált újszerű megközelítés milyen eredményeket szolgáltat.

Első körben mérésenként ciklikus voltammetriát hajtottunk végre, mely során a feszültséget ciklikusan változtattuk (50 - 1000 mV között fel és leterheléssel), és közben mértük az áramerősséget. E mérés kivitelezése után választ kaptunk arra, hogy a cella működik, így a polarizációs görbe felvétele következett.

Az első mérések során a cella feszültségének 0,8 V értékre emelése közben sajnos a rendszer hőmérséklet és nyomás növekedése nem megfelelően alakult, így a



7. ábra: A celláról felvett ciklikus voltammogram

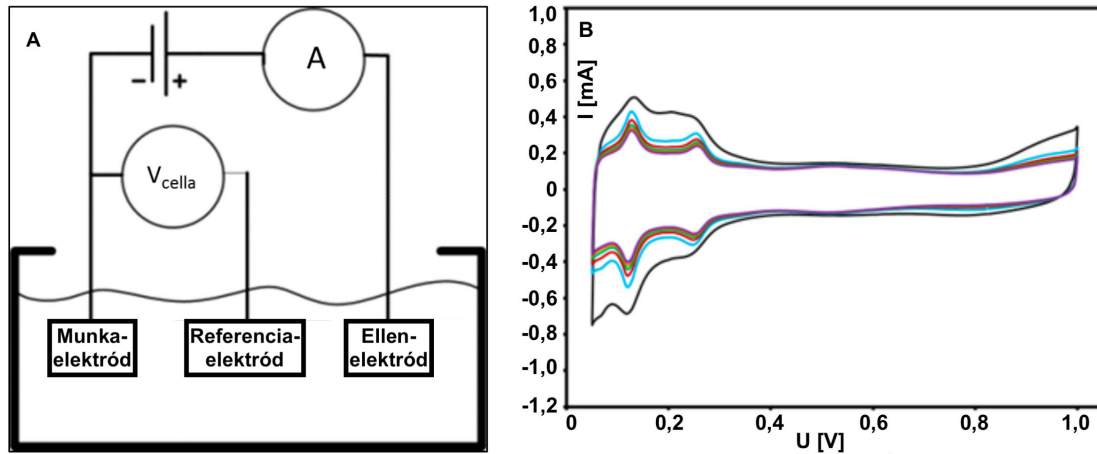
kísérletet módosítva hajtottuk végre, a leadott feszültséget 0,6 V értéken tartottuk. Ezt az utólagos vizsgálatok alapján meghatározott tömítetlenség okozta.

A módosítások után sikeresen meg tudtuk mérni a cella polarizációs görbét (7. ábra), és az eredmény bizonyította az új áramlási mező létjogosultságát.

A voltammetria (voltammogram) felvételének elvégzése alapvető minden új cella mérése során. Ezt elsőként szükséges elvégezni még az új cella aktiválása előtt. Amennyiben sikeres, akkor a cella feszültséget szolgáltat, azaz elektromosan terhelhető. A voltammetria esetén a 8. ábra szerint történik a mérés, viszont a mi mérésünk során nem három elektródos rendszert használtunk, hanem a tüzelőanyagcelláról közvetlenül vettük fel a ciklikus voltammogramot. Esetünkben a mérés és vele együtt az eredmény is módosult, mivel az anódra áramlott a H₂, ez lett a referencia és az ellenelektrod is egyben. A katódra inert gázt (nitrogén) áramoltattunk és ez lett a munkaelektrod.

Összehasonlítva a három elektródos rendszeren felvett voltammogramokat a tüzelőanyagcellán mérttel, két fő különbség jön ki. Az egyik az áramerősségek nagyságrendje (a tervezett cellán körülbelül 3 nagyságrenddel nagyobb áramerősségeket mérünk), ami a jóval nagyobb méretű elektródoknak köszönhető (0,0707-16 cm²). A másik fő különbség, hogy a cellán mért voltammogram alapvonala nem vízszintes, hanem egy pozitív meredekségű egyenes. Ez abból adódik, hogy a 3 elektródos rendszer ellenállása elhanyagolható, míg a tüzelőanyag-cellában a nagy méretű elektródok és bipoláris lemezek miatt az ellenállással is számolni kell. A voltammogram középső szakaszára illeszthető vonal (7. ábra piros vonal) meredeksége arányos a cella ellenállásával.

A tényleges teljesítménymérés, azaz a polarizációs görbe felvétele előtt minden új cellát aktiválni kell, mert így távolíthatók el azok a szennyeződések, amelyek a szerelés, előállítás során a MEA-ba kerültek. Továbbá segíti a Nafion hidratációját és a reakciók könnyebb katalizátorra jutását, ugyanis a Nafion csak hidratált állapotban válik igazán jó protonvezetővé. Az aktiválási folyamat legfeljebb



8. ábra: Háromelektrodos elektrokémiai cella
a) sematikus ábrája, b) mért ciklikus voltammogramja (1000-50 mV-ig, 100 mV/s mintavétellel)

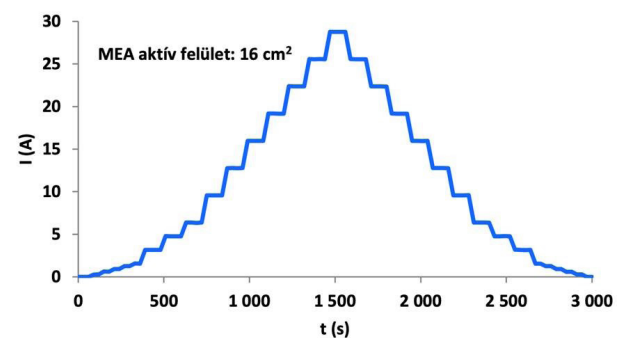
6 órát vesz igénybe. Nincs egzakt értéke, mivel csak akkor állítható le, amikor az áramerősség már nem változik. Jelen cella esetében az aktiválás 40 percig tartott, a feszültséget pedig 0,4 V-on tartottuk.

Aktiválást követően felvettük a tüzelőanyag-cella teljesítmény görbéjét, ezt polarizációs görbének, PolCurve-nek vagy áram feszültség (IV vagy UC) görbének hívjuk. A PolCurve három fő részt tartalmaz: 1) magas potenciálnál (800 mV fölött) egy logaritmikus feszültségesés van, amit az oxigén csökkenése miatti reakció okoz (ORR - Oxygen Reduction Reaction); 2) ezt egy lineáris rész követi, ahol a potenciál általában 800 mV és 600 mV között van, itt a csökkenést javarészt az Ohmos veszteségek okozzák; 3) alacsony potenciál esetén, különösen 500 mV alatt egy exponenciális feszültségesés történik, ezt a reagens tömegáram határértéke okozza.

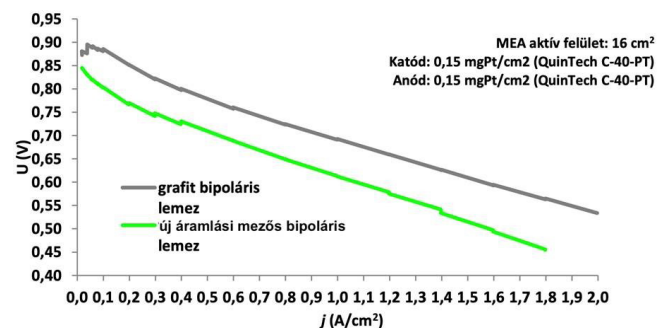
A PolCurve mérése fix működési feltételek között történik, miközben a köteg terhelése vagy árama lépésről lépésre változik alacsonyabbról a magasabb felé, majd ugyanígy vissza. A terhelés iránya (alacsonyabbról magasabb felé, vagy fordítva), időtartama és az egyes pontok mérési ideje is befolyásolja az eredményt. Az olyan teszt-pontokat, amelyek túl nagy sztöchiometrikus áramlást használnak, nagy óvatossággal kell kezelni (ilyen pl. a legnagyobb kötegáramnál 20%-kal kisebb elektromos terhelési szint), hogy a köteg károsodása és kiszáradása a lehető legkisebb legyen. Itt a lépések időtartamát 2 percre csökkentjük (1 perc stabilizációs idő +1 perc elemzési idő). A tesztprogram részeként lépésenként állítandó az áramsűrűség.

A polarizációs görbe felvétele során az áramerősség illetve áramsűrűség függvényében mértük a cella feszültségét. Nulla értékről indítottuk, tíz másodpercenként a terhelést növeltük, egészen addig, míg a cella feszültsége 0,4 V-ra csökkent le. A kapott görbét egy a TTK-n végzett korábbi méréssel összevetettük (9., 10., 11. ábra). A két cella mindenben megegyezik (pl. MEA, mérési paraméterek) csak a bipolaris lemezek áramlási mezejének kialakítása különbözik.

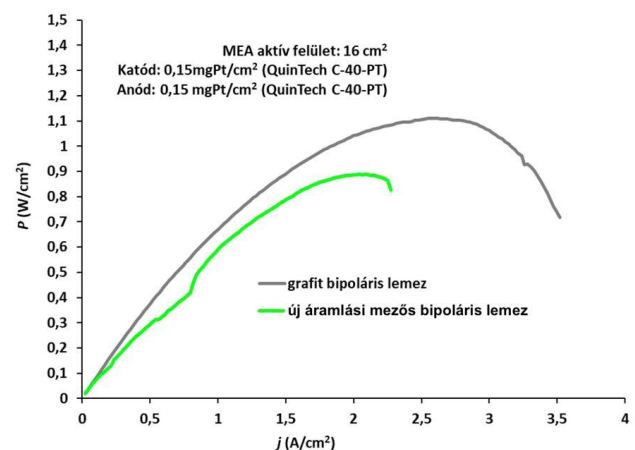
Látható, hogy a tervezett cella kialakítás teljes mértékben működőképes, hiszen nyomástartó, azaz gázzzivárgás



9. ábra: A polarizációs görbe vizsgálati program



10. ábra: Korábbi TTK cellamérés és az új tervezett áramlási mezővel rendelkező cella polarizációs görbéi



11. ábra: Korábbi TTK cellamérés és az új tervezett áramlási mezővel rendelkező cella teljesítmény maximumai

mentes, és lefutott rajta a polarizációs görbe felvételi mérés. A TTK korábbi mérési eredményétől elmaradnak a tervezett cella értékei, mivel azok bipoláris lemeze grafitból készült, míg az általunk tervezett cella korrózióálló acélból készített lemezzel szerelt. A két anyag elektromos vezetőképessége nagyban különbözik. Az általunk használt acéllemez $1,37 \times 10^6$ Siemens/m [12], addig a grafit megközelítőleg 3×10^5 Siemens/m [13] vezetőképességgel rendelkezik.

5. Összefoglalás

Az új vízióval kialakított koncepció sikeres az eddigi mérések alapján:

- új áramlási mező kidolgozásra és kialakításra került;
- megterveztük és szimuláltuk kis cellaméretben az új áramlási mező gépészeti környezetét;
- a "deszkapéldány" elkészült bemérése megtörtént. Az eredmények pedig kijelölték a továbblépés irányát.

Fontos, hogy a laborméretű cellák helyett ipari alkalmazásoknak megfelelő cellaméreteket is ellenőrizzük a vízionált koncepció életképességét.

Irodalomjegyzék

- [1] Székely Sipos Sándor Zoltán: Agile ésszerűen, <https://slidetodoc.com/agile-sszeren-szekely-sipos-sndor-zolta-tartalom-a/> (Megtekintés dátuma: 2021.10.28.)
- [2] Számolás alapjait képző képletek, <https://www.cfd-online.com/Forums/fluent/46960-viscous-resistance-coefficients-porous-medium.html> (Megtekintés dátuma: 2021.09.22.)
- [3] T. Pajkossy: Elektrodegyensúlyok és folyamatok, Emlékeztető segédanyag a Fizikai-kémia előadáshoz, MTA KK AKI (2004)
- [4] Magyar Hidrogén és Tüzelőanyag-cella Egyesület: <https://www.hfc-hungary.org/tuzeloanyag-cellak/> (Megtekintés dátuma: 2020.10.30.)
- [5] Bondor Márk – BME: Üzemanyagcellák: [http://energia.bme.hu/~kaszas/Energetika%20\(menedzsereknek\)/besz%C3%A1mol%C3%B3k/%C3%9Czemanyagcella.pptx](http://energia.bme.hu/~kaszas/Energetika%20(menedzsereknek)/besz%C3%A1mol%C3%B3k/%C3%9Czemanyagcella.pptx) (Megtekintés dátuma: 2020.10.24.)
- [6] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – Stack-Test Master Document: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TM_P-00_Stack-Test_Master_Document_Version_1.01_2015-10-19_clean.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.09.18.)
- [7] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – P01 Test Module: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TMs/TM_P-01_Humidity_Sensitivity.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.09.18.)
- [8] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – P02 Test Module: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TMs/TM_P-02_Temperature_Sensitivity.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.09.19.)
- [9] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – P03 Test Module: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TMs/TM_P-03_Pressure_Sensitivity.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.09.19.)
- [10] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – P08 Test Module, Stack-Test Master Document: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TMs/TM_P-08_Polarisation_Curve.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.08.24.)
- [11] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – Stack-Test Master Document: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TM_P-00_Stack-Test_Master_Document_Version_1.01_2015-10-19_clean.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.08.24.)
- [12] 1.403 acél elektromos vezetőképessége: https://www.tibtech.com/conductivite.php?lang=en_US (Megtekintés dátuma: 2021.12.13.)
- [13] Grafit elektromos vezetőképessége: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499> (Megtekintés dátuma: 2021.12.13.)
- [14] Tüzelőanyag-cella működésének bemutatása: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/what-is-a-fuel-cell> (Megtekintés: 2022.06.20.)



ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA HIRDESSEN NÁLUNK!

Érje el a szakmai partnereit,
leendő ügyfeleit!

Hirdessen

az **Anyagvizsgálók Lapjával!**

Lehetőséget biztosítunk

a nyomtatott kiadványban,
honlapunkon,
vagy a közösségi médiában

hirdetéseinek megjelenítéséhez.

Egyedi árajánlatért írjon az alábbi e-mail címre:

avilap.szerk@gmail.com