



**Pannon Egyetem
Intézményi Tudományos Diákköri
Konferencia
2022**



Monokristályos napelemek minősítési módszerei

Készítette: Patthy Gergely Balázs

Témavezető: Jakab Miklós, PhD hallgató, Tudományos segédmunkatárs

Mérnöki Kar, Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ,
Anyagmérnöki Intézeti Tanszék

A pályamunka lezárásának dátuma: 2022.11.04.

Tartalomjegyzék

1. Szakirodalmi összefoglalás.....	1
1.1 A napelemek jelentősége a világ energiatermelésében	1
1.2 Célkitűzés	3
1.3 Napelem típusok és generációk	3
1.4 A szilícium napelem cella	4
1.5 Első generációs szilícium napelem technológiák	7
1.6 A monokristályos cella gyártástechnológiája	8
1.7 Elektromos tulajdonságok, tesztelés, mérés	11
1.8 Környezeti behatások, hibaforrások	15
2. Vizsgálati módszerek.....	17
2.1. Teljesítménymérés.....	17
2.2. Kémiai ellenállóképesség vizsgálata	17
2.3. Klímakamrás vizsgálat	18
2.4. Mechanikai ellenállóképesség 1. – Ütőszilárdság.....	19
2.5. Mechanikai ellenállóképesség 2. - Pontszerű terheléssel szembeni ellenállóképesség	19
2.6. Mechanikai ellenállóképesség 3. - Statikus terheléssel szembeni ellenállóképesség	20
2.7. Műszeres színmérés	20
2.8. Mikrokeménység meghatározása	20
2.9. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok	21
2.10. Fényáteresztő képesség	21
2.11. Fénymikroszkópos vizsgálat	22
2.12. Fourier-transzformációs Infravörös spektroszkópia	22

2.2.5 Polimerizáció fok mérése- Soxhlet-extrakció	22
2.2.6 Polimerizáció fok mérése- Kalorimetriás módszer	23
3. Vizsgálati eredmények és értékelésük	23
3.1 Az alapanyagok tesztje	24
3.1.1 Az üveg vizsgálata	24
3.1.2 Polimer fóliák vizsgálata	27
3.1.3 A perforált waferek vizsgálata	29
3.1.4 A ribbonok vizsgálata:	33
3.2 A laminált cellákon végzett mérések	35
3.2.1 Kombinált klímakamrás vizsgálat	36
3.3.2 Mechanikai ellenállóképesség 1. – Ütőszilárdság	38
3.3.3 Mechanikai ellenállóképesség 2. - Pontszerű terheléssel szembeni ellenállóképesség	41
3.3.4 Mechanikai ellenállóképesség 3. - Statikus terheléssel szembeni ellenállóképesség	41
4. A hőkezelés hatása a etilén-vinil-acetát fóliára	43
5. Összegzés	47
6. Források	48

1. Szakirodalmi összefoglalás

Kutatásom során egy újfajta, tetőcserépre integrálható napelem panelek gyártási paramétereinek a hatását vizsgálom a kész termék minőségére vonatkozóan. A napelem klasszikus monokristályos szilíciumon alapul, amely még mindig a legjobb teljesítmény-ár arányt nyújtja a piacon fellelhető technológiák közül, így az átlagfogyasztó számára is megfizethető. A napelemek több alegységből készülnek laminálás útján, ennek eredménye az építőanyagra való integrálásra kész panel.

A kutatás célja az integrálásra kész panel terhelhetőségének vizsgálata. Erre azért van szükség, mert a panel csak akkor tekinthető környezetbarátnak, ha gyártásához felhasznált energiát legalább visszatermeli és minél hosszabb élettartammal rendelkezik. Utóbbi fő oka, hogy a Föld az elektronikai célú szilíciumra nézve zárt rendszer, előbb-utóbb el fog fogyni, a napelemek újrahasznosíthatóságára pedig jelenleg még nincs mód. Nem mindegy hát, hogy mennyi ideig tudnak üzemelni. A hosszútávú működés és a minőség biztosítása érdekében egy olyan teszt sorozatot hoztunk létre, amelyekkel a panelek minősítése alkalmassá válik. A tesztek során, mind az alapanyagokat, mind a kész termékeket vizsgáljuk. Alapanyag szinten az egyedi tulajdonságok, például összetétel, szakítószilárdság, vagy keménység mérése a cél, cellaszinten pedig az egész rendszert érő behatásokat (mechanikai, kémiai, környezeti) vizsgáljuk, amelyek a teljesítményt és ezáltal a hatásfokot hátrányosan érinthetik. A mérések során a fő minősítést egy folyamatos megvilágítással dolgozó teljesítménymérővel mérjük.

1.1 A napelemek jelentősége a világ energiatermelésében

A globalizálódó, folyamatosan fejlődő világnak egyre több és több villamosenergia kell. Az IEA adatai alapján 1990-ben még csak 10897,9 TWh energiát használtunk el világszinten, ez 2019-re 25027,3 TWh-ra nőtt meg, tehát a villamosenergia-igény közel 2,30-szorossá vált a kérdéses időszakban [1]. A legjellemzőbb energiaforrás a kőszén [25]. Fontossága különösen magas Kínában, itt a teljes nyersanyagkitermelés 76%-át, a teljes felhasználás 69%-át adja a kőszén és előreláthatóan még 50 évig fogja a fő szerepet képviselni [2].

A kőszénnel azonban számos probléma van. A bányászatnak több formájával feltárható a szén, ez történhet külszíni fejtéssel és mélyműveléssel is. A külszíni fejtés közvetlenül rombolja a környezetet, hiszen a közetréteghez való hozzáféréshez szükséges a talaj és az élővilág teljes

eltávolítása, ez különösen veszélyes rövid- és hosszútávon is a talajtól kezdve a vízkészletekig [3]. A mélyművelés is rendelkezik nemkívánatos környezeti hatásokkal, például csuszamlásokkal, süllyedésekkel, víznyerőhelyek megsemmisülésével jár. [2]. Mindkét esetben probléma a meddőközet elhelyezése. Másrészt, a szén energiává alakítása égetéssel történik. Ez a nem korszerűsített hőerőművek esetén jelenthet gondot, a hőszennyezés mellett a kőszén elégetése számos egyéb, környezetre és emberre veszélyes gáz felszabadulásával jár, ami megfelelő szűrés és ártalmatlanítás nélkül súlyos károkat okoz. Ez abból adódik, hogy a kitermelt kőszén sosem teljesen tiszta. A szennyezés eredményeként kén-dioxid (SO_2), nitrogén-oxidok (NO_x), nehézfémek, valamint hamu és nem ülepedő por kerül a levegőbe. A jelenleg, az Európai Unióban érvényes tiszta levegő szabályozás értelmében a kitermelt szenet tisztítani kell, valamint az erőműveket fel kell szerelni szűrő- („kénfogó”), visszanyerő- és gáztisztító berendezésekkel [4]. A legnagyobb probléma azonban a kőszén fosszilis mivolta. Egy 2016-ban készült tanulmány becslése szerint körülbelül 1.139.471.430.000 tonna kitermelhető kőszén van még a világban, amit -amennyiben az energiafogyasztási szint nem emelkedik- 133 éven belül használunk el [5].

Az előbbieken felsorolt súlyos tényezők megoldásra szorulnak. Szerencsére villamosenergia-termelésre van már számos alternatíva áll rendelkezésre, köztük megújuló energiaforrásokon alapuló lehetőségek. Ezek közül a napenergia és a napelemek kitűnő választás lehet a jövő számára. Alkalmazásuk mellett szól például az, hogy a tájkép fenntartható, szemben a szélerőművekkel, energiatermelés közben nem bocsájt ki káros anyagokat, ez a biogázzal és biomasszával szembeni nagy előnye. Ráadásul, mivel a Nap fénye bolygó szerte elérhető, nem függ a helyi erőforrásoktól [6]. További előnye, hogy a Nap egy szinte kifogyhatatlan energiaforrásként tartja pályán a Földet: csak napenergiából jelenleg 15420-szor több energia érkezik, mint amit az emberiség egy év alatt felhasznál [7]. Elviekben tehát lehetőségünk lenne arra, hogy az emberiség energiaigényét csak ezen a módon kielégítsük. És ez nem csak az egyetlen mód arra, hogy kihasználjuk a napenergiát: megfelelő építészeti tervezéssel passzív fűtésre, napkollektorokkal vízmelegítési célra hasznosítható [6].

Szerencsére a világ teljes energiatermelésében a napelemek jelentősége folyamatosan nő. Az első megawatt nagyságrendű napenergiát hasznosító erőmű 1982-ben nyílt meg a kaliforniai Hesperióban (ARCO Solar). [30] A zöld energiatermelésre irányuló fokozott figyelem megtette hatását a téren: 2016-ra a kumulatív kapacitás átlepte a 303GW-ot (Grentech) [31].

1.2 Célkitűzés

Kutatásom során egy olyan napelem cella tulajdonságait tanulmányozom, amely tetőcserépre integrálható. A termék fő célja, hogy a napelemes termelési formát kompakt, olcsó, strapabíró, és „hasznos” formában elérhetővé tegye az átlagfogyasztó számára. A technológia legnagyobb előnye, hogy jóval nagyobb felületet fedhető le vele, mint a korábban megszokott nagyméretű panelekkel. A cellának azonban bírnia kell a környezeti hatásokat, az időjárást és az egyéb terheléseket és behatásokat. Kutatásom során egy méréssorozatot fogok a cellán elvégezni, acélból, hogy a megfélelőséget bizonyítani lehessen és meg lehessen állapítani a cella várható élettartamát, hiszen a félvezető minőségű kvarchomokra nézve a Föld zárt rendszer és csak akkor lehet ezeket a napelemes rendszereket környezetbarátnak tekinteni, amennyiben az élettartama során több energiát termel, mint amit bele kellett fektetni a gyártásába [26]. A kutatás célja tehát a laminálási technológiával gyártott napelem panelek várható élettartamának becslése a gyártási paraméterektől függően, illetve a rendelkezésre álló kísérleti eredmények alapján javaslattétel az integrált termékek minőségfejlesztésére vonatkozóan.

1.3 Napelem típusok és generációk

Ha napelem cellákról beszélünk, egy viszonylag tág eszközcsoport juthat a szóról eszünkbe. Közös jellemzőjük, hogy bennük a töltésszétválasztást, tehát a feltételt, hogy áramforrásként tudjanak működni, fényenergia biztosítja. Ezt a fotovoltaikus hatás teszi lehetővé, ezért ezeket az eszközöket PV (az angol photovoltaic rövidítésből) eszközöknek nevezzük. Bár szerteágazó a technológia, a panelek alapvetően három nagy csoportba vagy generációba sorolhatók [8]:

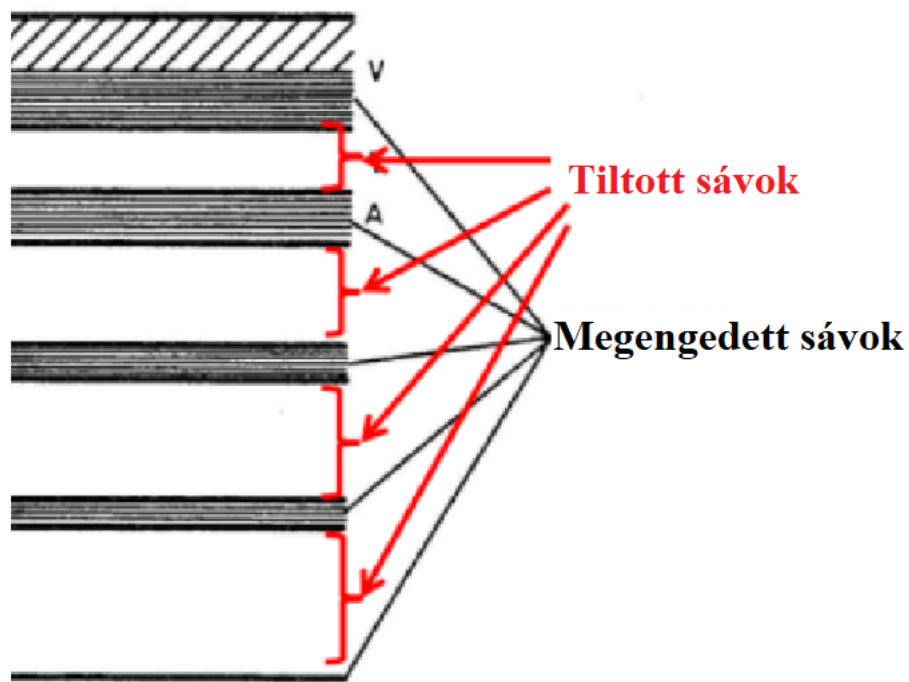
1. A szilárdtest napelemek a „klasszikus” és elterjedt cellák. Alapanyaguk általában szilícium, amely többféle kristályformában (mono, poli, hibrid, amorf) előfordulhat, amelyeket méretre vágott félvezető lapkák (méretre vágva, a hagyományos kialakítású „nagy” cellákon 100 mm x 100 mm x ~0,3 mm méretűek) formájában visznek fel a hordozóra. Ezeket a lapkákat hívjuk ostyának vagy wafernek. Általában egy átmeneteselek. 10-25%-os hatásfokkal működnek, 0,5-0,7 V kapocsfeszültség mellett. Részletes leírásukat lásd a „1.4 A szilícium napelem cella” alfejezetben [8,9].
2. Vékonyfilm napelemek, amelyek a nevüket a kialakításukról kapták: itt nem szilárd waferekből kerül kialakításra a cella, hanem egy hordozóra történő közvetlen felgőzöltetéssel történik a p-n átmenet kialakítása. Vegyülettípusú napelemeknek is

nevezik őket, mert az alapanyag sokkal változatosabb, mint a szilárdtest napelemeknél. Ilyen anyagrendszer a gallium-arzenid (GaAs) vagy a kadmium-telluroid (CdTe), de lehet szilícium is. Működésük hasonló a szilíciumos megoldásokhoz. Általában monokomponensesek, de hatásfoknövelés, vagy egyéb okokból, mint például a réz-indium-szelenid (CuInSe_2) esetén (csak p-típusa létezik, ezért n-típusú komplementerre kell felgőzölni, például kadmium-szulfid (CdS), vagy cink-oxid (ZnO) rétegre) lehetnek hibrid rendszerek. Előnyük a szilárdtest cellákkal szemben, hogy több átmenetet is létre lehet hozni, ezáltal tovább növelve a hatásfokot és a teljesítményt. Csak a félvezető rendszert használva kisebb hatásfokot érhetünk el, mint a szilárdtest cellák esetén, ezt az értéket azonban koncentrátorral tovább lehet növelni. A legnagyobb elért hatásfok 34% volt. Ezt GaAs és Gallium-stibiumid (GaSb) kombinációval, 100-szoros koncentrátorral érték el. Elterjedésüket két dolog akadályozza: alapesetben bár a teljesítmény-beszerzés arány jobb, mint a szilárdtest celláknál, a hatásfokuk roppant alacsony [8]. Amennyiben azonban sikerül jó hatásfokú cellát építeni, a bekerülési költség megfizethetetlen az átlagfogyasztó számára. Ez utóbbiakat speciális területeken, például az űrkutatásban használják (például a Curiosity marsroveren) [10].

3. A jövő: Ide számos jelenleg is fejlesztés alatt álló technológiát sorolhatunk. Ilyen például a festékekkel érzékenyített fotokémiai alapon működő TiO_2 cella. Ígéretes, 10%-os hatásfokot is elértek vele. Jelenleg gyakorlati szempontból még nem jelentősek [8].

1.4 A szilícium napelem cella

A szilícium egy félvezető, nemfémes elem, a 4-ik főcsoportban található a periódusos rendszeren belül. Tiszta állapotában gyémántrácsszerű kristályt alkot, ahol minden atomhoz négy másik kapcsolódik. Ezt a kezdeti állapotot nevezzük intrinsic, vagy tiszta állapotnak [37]. Ebben az állapotban a félvezető, különösen 0 K-en szigetelőként viselkedik. Magasabb hőmérsékleten azonban fordított összefüggést kapunk, mint fémek esetén: a szilícium egyre jobban vezetni kezd. Ez a sajátvezetés, ami azt jelenti, hogy ha valamilyen külső hatásra egy elektront sikerül eltávolítani, a keletkezett lyukat képes egy elektron feltölteni úgy, hogy átugrik egy másik kötéstől a kötésrendszeren belül. Erre a jelenségre a sávmélet ad magyarázatot. A sávméletet az 1. ábra mutatja:



1. ábra: A sávmélet összefoglaló ábra. [9]

A sávmélet az elektronok energiájára ad magyarázatot. Az atommag körül az elektronok csak olyan energiaszinten (vö. pályákon) helyezkedhetnek el, ami a betöltött sávokon lehetséges. A betöltött sávokra az elektronok átugorhatnak, de ekkor meg kell ugraniuk egy energiagátat. Ezt a gátat nevezzük tiltott sávnak. A tiltott sávok a magtól távolodva szűkülnek, mert a mag elektronokra gyakorolt vonzó hatása csökken. Az elemek esetén a gátat általában csak a külső elektronok ugorják át, a vegyérték alapsáv tehát kitüntetett szereppel bír. Található még egy úgynevezett vezetési sáv is. Ha az elektron bekerül ebbe az állapotba, képes leszakadni a magról, és áramló töltéshordozóvá válni. Ez a vezető anyagoknál, például a fémeknél egybeesik a vegyértéksávval, szigetelő anyagok esetén pedig nagy tiltott sáv választja el a vezetési sávot és a vegyértéksávot. Félvezetők esetén ez a tiltott sáv azonban alacsony, szilícium esetén szobahőmérsékleten 1,12 eV [8,9,11]. A töltéshordozók aránya azonban jóval alacsonyabb, mint a fémek esetén. A szilíciumban $T=300\text{ K}$ hőmérsékleten $1.6 \times 10^7\text{ db/mm}^3$ elektront jelent, ami jóval kisebb, mint a fémekben található $10^{20}\text{-}10^{22}\text{ db/mm}^3$ töltéshordozó [8]. A vezetésre képes elektronokat tehát a biztos működés céljából külsőleg kell bevinni. Ezt az irányított szennyezéssel (doping) kétféle módon lehet megtenni: vagy eggyel nagyobb, vagy eggyel kisebb főcsoportbeli (oszlopbeli) elemmel szennyezzük. Ez azt jelenti, hogy a szennyezést végezhethetjük a harmadik főcsoportból származó (bór, alumínium, gallium, indium), vagy az ötödik főcsoportból származó (Foszfór, arzén, antimon) elemmel. Amennyiben eggyel kisebb főcsoportszámú elemmel szennyezzük, a szennyező ugyanúgy beépül a rácsba, mintha

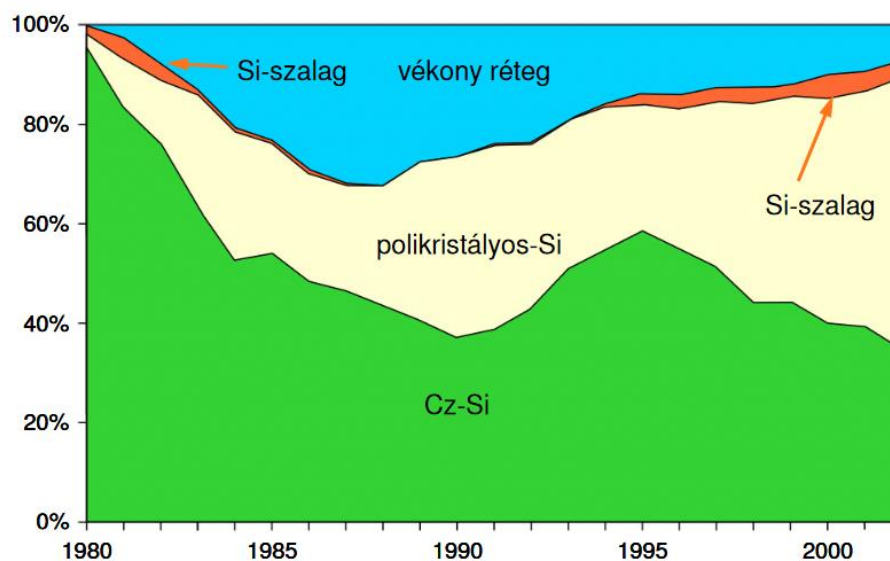
szilícium lenne. Azonban nem tud mind a négy kötés kiépülni, hiszen ezek az atomok eggyel kevesebb vegyértékelektronnal rendelkeznek, mint a szilícium. Az ilyen vegyületekben az elektronhiány, a lyuk vándorol. Ezt hívjuk pozitív (p-típusú) félvezetőknek. Ha eggyel nagyobb főcsoportszámú elemmel szennyezzük, a beépülés ugyanúgy megtörténik, de egy plusz elektron kerül a rendszerbe. A plusz elektron ezután képes a kötések mentén vándorlásra, elektronvezetés történik. Ez a negatív (n-típusú) félvezető [8, 13].

Amennyiben a két réteg találkozik, a p-n határfelületen egy átmeneti jelenség játszódik le. Az átmenet környékén az elektronok az n rétegből a p rétegbe áramlanak, ahol megtörténik az elektron-lyuk rekombináció, ezzel egy telített és semleges réteg alakul ki helyileg. Ezen a rétegen a töltéshordozók nem jutnak át, ezért az n és a p réteg stabilizálódik. Kialakul a legegyszerűbb félvezető elem a dióda. Ha a dióda két kivezetésére megfelelően (az n rétegre pozitív, a p rétegre negatív) feszültséget kapcsolunk, a dióda vezetni kezd, mert a semleges határréteg a feszültség hatására beszűkül. Ez a nyitó irányú kapcsolás. Ha fordítva, záró irányba kapcsoljuk a diódát, a semleges határréteg kiszélesedik, a dióda lezár, nem vezet (egészen a letörési feszültségig, ahol a dióda tönkremegy, kivéve a Zener-diódákat).

A napelem valójában nem több, mint egy félvezető, amiben egy p-n átmenet található. Lényegében tehát egy nagy felületű dióda. Az elektromos áram termelésére a magyarázatot a határfelületi jelenségekkel és a sávmélettel lehet magyarázni. Maga az áramtermelés, és az ehhez szükséges töltésszétválasztás három lépésből áll: fénylenyelés, lokális szétválasztás és elvezetés. A fénylenyelés a p-n átmeneten történik, az n oldal felől. A fénylenyelés során a semleges átmeneti zónában az elektronok a fény hatására gerjesztett állapotba kerülnek, ennek eredményeképp az elektronok a vezetési sávba, míg a lyukak a vegyértéksávba kerülnek. Az elnyelhető fény egy jellemző, hosszúhullám tartományba eső hullámhosszra esik, elnyelése a kristályos szilíciumon minimum 150 μm rétegvastagságot igényel, a waferek általában 220-230 μm vastagságban készülnek. Az elnyelés és a gerjesztés után megtörténik a töltésszétválasztás: az elektronok az n réteg felé, a lyukak a p réteg felé indulnak el. Ez kristályos szilíciumban diffúzióval történik, de ismertek más szétválasztási módok is, más anyagrendszerekben (például alagúthatás az Esaki-diódákban). A szétválás után a töltéshordozók elvezethetők. A napelem két rétegén elektromos kontaktokat alakítunk ki, amiken keresztül áramforrásként áramkörbe építhetők. Egyenáramú áramforrások, a polaritás a következőképp alakul: a negatív pólus az n réteg lesz, a pozitív pólus pedig a p réteg. Az elektromos kontaktok csatlakozási ellenállásának kicsinek kell lenniük, a veszteségek minimalizálása céljából [13].

1.5 Első generációs szilícium napelem technológiák

A szilíciumon alapuló első generációs, vagy szilárdtest-cellák többféle alapanyaggal készülnek. Az alapanyag szilícium, melyet valamilyen módon kristályosítanak, majd a kristályokból megfelelő vastagságú lapokat (wafer) vágnak, később helyileg szennyezik, a megfelelő szennyezőkkel (foszfor-n, bór-p) [14]. Az alapanyag ezzel készen áll a további felhasználásra. Három nagy technológiát különböztethetünk meg: a monokristályos, a polikristályos és a szalaghúzásos technikát [13]. Az alapanyag kiválasztása fontos, mert a gyártási költség 50%-a ebből származik [15].



2. ábra: Különböző Si alapú napelemek piaci részesedése. [13]

A monokristályos cella (a tesztelendő cella is ilyen technológián alapul) alapanyaga a szilícium egykristály. Az egykristályt jó minőségű szilíciumból, általában Czochralski-féle kristálynövesztési módszerrel (Cz-eljárás) állítják elő. Az eljárás során a tiszta szilíciumot megolvasztják, majd egy szilárd „oltókristályt” engednek az olvadékba. A kristály lassú kihúása közben valamilyen forgató hatással, általában mágneses erővel stabilizálják a növekvő kristályt. A kapott kristály henger alakú, a kristályhibák a különféle szabályzó eljárásoknak köszönhetően nem jelentősek [16]. Az ebből az alapanyagból készült napelemek hatásfoka a legjobb (akár $\eta=26,1\%$) a szilíciumalapúakból, viszont ezek a cellák a legdrágábbak [11]. Visszaszorulóban vannak a piacon (2. ábra) [13].

A polikristályos cella a jelenleg legelterjedtebb cellatípus (2-es ábra) [13]. A wafer itt is szilíciumból áll, de nem egy nagy, hanem sok kicsi kristály alkotja a lapkát. A

kristálynövesztést olvasztótégelyben végzik, ahol irányított kristálynövesztést hajtanak végre. Az irányítást a tégely hűtésével érik el, eredményként oszlopszerű kristályokat kapnak az öntvényen belül [14]. Elterjedését a monokristályoshoz hasonló, de alacsonyabb ($\eta_{\max}=23,3\%$) hatásfoka ellenére az alacsonyabb gyártási költségek, kisebb bekerülési költségek és az alacsonyabb minőségű alapanyag megfelelőségéből adódó jobb teljesítmény-ár arányának köszönheti. További előnye, hogy a szórt fényt jobban tudja hasznosítani [11, 14].

A szalaghúzásos cella: szerkezetileg teljesen megegyezik a polikristályossal. Gyártástechnológiája azonban különbözik: abból a felismerésből indultak ki, hogy az egykristály/öntvény darabolása során akár 50%-nyi alapanyagvesztés is fellelhető. Ezt szerették volna kiküszöbölni. A technika során a szilícium olvadékot két húr között húzták át, ezzel érve el a 220-230 μm -es vastagságot, így csökkentve a darabolási veszteségeket, amivel a cellák ára igen alacsony lehetne. Bár 2006-ban még folytak kutatások a fejlesztésre, a számos probléma, például a kristályon belüli rengeteg szerkezeti hiba, az ezekből következő problémák, például a nehéz töltésszétválás, a töltéshordozók rövid élettartama, az erős adalékolás szükségessége (ezek nélkül nem használható jól), az alacsony maximális ($\eta=16,8\text{--}18,3\%$ max.) hatásfok mellett a legnagyobb gyártó, az Evergreen Solar USA-beli gyárának bezárása után a technológia gyakorlatilag kihaltak tekinthető [17,18].

1.6 A monokristályos cella gyártástechnológiája

A cellák alapanyaga Kínában készül [19]. A szilíciumot Cz-eljárással (lásd 1.5. „Első generációs szilícium napelem technológiák” alfejezet). növesztik. A megnövesztett egykristályt ezután megfelelő vastagságú szeletekre vágják, a célméret vastagabb, mint a végső 220-230 μm [13]. Ezt standard belső átmérős fűrésszel vagy folyamatos drótfűrészes módszerrel érik el. A körszeleteket ezután „négyzetesítik”, azaz nyolcszögeket alakítanak ki levágással. Ezután következik a waferek felületén lévő por és szennyeződések eltávolítása maratással, ami általában nátrium-hidroxiddal (NaOH) történik. A maratás során körülbelül 10 μm kerül eltávolításra a lap felületéről. Ekkor azt tapasztalhatjuk, hogy a felületen miniatűr gúlak keletkeznek. Kontrollált körülmények között ez előnyös lehet, mert ezek a gúlak szórják a fényt, ami miatt az nagyobb felületen éri a wafert, tehát passzív módon javítható a hatásfok. Ez alkohol hozzáadásával, valamint a környezet szabályozásával ($c_{\text{NaOH}}=5\text{ M}$, $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=900\text{ s}$) homogenizálni lehet. A folyamat befejezésével egy rövid, savas maratást végeznek el, a lúgnyomok eltávolítása céljából. Ezután megtörténik a szennyezés, az n réteghez foszfort

használnak, oldaton alapuló diffúziós módszerrel (egyoldalú szennyezés). A wafer azonban még nincs kész, jelen állapotában a szélei még vezetnek, szükség van a szigetelésre. Ez az ostya széleinek lemarásával történik meg, amit végezhetnek száraz maratással, plazmás maratással, vagy lézervágással. A maratás után napelemek szempontjából két fontos lépés következik. Először a tükröződésgátló felületi réteg kialakítása, amely a napsugárzás energiájának hasznosulását segíti. Erre közkedvelt anyag a titán-dioxid (TiO_2), vagy a szilícium-nitrid (Si_3N_4). Ezek egyedülálló fénytörési tulajdonságaik miatt alkalmasak ilyen célra, azonban ez nem mindig történik meg, mert ha a gúlak növesztése megfelelő, a tükröződés külön réteg felvitele nélkül csökkenthető. A második lépés a kontaktrács kialakítása, amelyen keresztül a napelem termelte elektromos energia elvezethető. Ezt jelenleg filmnyomósos-égetéses módszerrel történik, ahol az ezüstalapú (p oldalon hozzáadott alumíniumot is tartalmazó) pasztát a filmnyomógép a kívánt mintázat szerint felnyomja, majd a szerves komponensek kiégetésre kerülnek, így a fémek a szilíciumlap felületére, de nem a p-n átmenetre kerülnek. A gyártás itt befejeződik, ezután még egy késztermék ellenőrző teszt (end of line test) következik, amely alapján osztályozzák a wafereket, majd csomagolják őket [14].

Ezután egy másik helyszínen, a vizsgált panel esetében Magyarországon folytatódik a gyártás. Itt történik magának a napelem cellának az összeszerelése. A beérkező alapanyag 156,75 mm $\times$ 156,75 mm-es napelem wafer, amely 1000 W/m² megvilágítás mellett 0,5 V feszültséget és 10 A áramerősséget ad le. A waferen ezt elvezető kontaktrácson két típusú vezető réteget különböztetünk meg: a vékony, kontaktot biztosító és a forrasztásra közvetlenül alkalmas gyűjtősíneket („finger”, illetve „bus bar”). A bekerülés után következik a darabolási fázis. Erre azért van szükség, mert a darabok feszültsége a darabolás során nem változik, de az áramerősség a felülettel arányosan csökken, az elektromos veszteségek pedig az áramerősség négyzetével arányosak. A darabolás lézerrel történik, a forrás IPG gyártmányú, száloptikás kialakítású (IPG Y fiber), teljesítménye 60 W. A lézer nem vágja át teljesen a wafert, mert ha a p-n átmenetet megsérti, akkor mikrozáratok keletkezhetnek benne. Ezért csak 30 μm -ig történő bekarcolás történik, a darabolás kézzel fejeződik be. Ezután gépi forrasztással a darabokat sorosan egymáshoz forrasztják, amivel kialakítanak egy több, azonos típusú és teljesítményű napelem wafer összekapcsolásából álló villamos hálózatot. Ezek az energiatermelési alapegységek, a string-ek. Egy string 13 darab ostyaszeletből áll, amelyet ónnal (~65 m/m%) és ólommal (~35 m/m%) bevont réz huzallal (ribbon) kapcsolnak össze, forrasztással. Az összeszerelés ezután kézzel történik, egy Bosch-palettás rendszeren, több operátorállással. A Bosch-paletta egyben a terméket összeszerelés során rögzítő és a helyes

összeszerelést segítő sablonként, azaz jig-ként is szolgál, ebbe először is egy edzett üveglap, az üveglapra pedig egy etilén-vinil-acetát (EVA) fólia kerül. Ez utóbbi kitűnő választás erre a célra, mert magasabb, $\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten, vákuumban víztisztává válik, ráadásul nagyon erős adhéziós erők kialakítására képes, ezért alkalmas a laminátum összefogatására és a stringek megtartására. A téglalap alakú üveglapra és fóliára még két teflonszalagot ragasztanak a hosszanti oldalaik mentén, ezzel védve azokat a forrasztási fázis során. A következő lépés a cella lényegét alkotó 6 string polaritásnak megfelelő elhelyezése, majd egy hőforrással megmelegítik a stringek hátulját. Ennek célja az EVA fólia megolvasztása, ami hozzátapad a stringekhez, egyhelyben tartva azokat. Ezt a lépést nevezzük tag-elésnek. A következő lépés a cellamátrix kialakítása. A kialakítás során egy fémötvözetből készült vezető szalagot, úgynevezett ribbont forrasztanak a stringek megfelelő végeihez, az egyik ribbon diódákat tartalmaz. A diódákra azért van szükség, mert ha a string nem termel (árnyékba kerül), akkor fogyasztóvá válik, energiavesztést okoz. Ezért fontos a stringek esetleges leválasztása. A két szélső ribbon végeit ezután kivezetésként lehet használni. A kivezetések a hátlapon kapnak majd helyet, de előtte még egy üvegfóliát helyeznek a cellamátrix hátuljára, melynek az a szerepe, hogy annak elmozdulását a laminálás során megakadályozza, erre kerül még egy EVA fólia és a szigetelő polipropilén hátlap. A kontaktokat itt vezetik ki, az erre kialakított nyíláson keresztül. Az összeszerelés itt véget ért, egy optikai ellenőrzés és egy feszültségteszt után kerül sor a laminátum kialakítására.

A laminálást kétkamrás, olajfűtött laminátorban végzik. Eredetileg $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on és 5 mbar nyomáson az első kamrában a panel 8-12 másodperc alatt $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra melegeedett fel, majd átkerült a második kamrába, ahol lassú nyomásemelést hajtottak végre. 8-12 perccel később innét is kikerült, és a panelt levegőn lehűtötték.

A laminálás során megolvadt fóliák a panel szélein sorjaként megjelennek, amit el kell távolítani. A folyamat gépesített, a durva sorjázás forgatóasztallal és fűtött késekkel, a finom eltávolítás kefékkel történik. A panel ezzel elkészült, szállítható a végleges összeszerelési helyre [19].

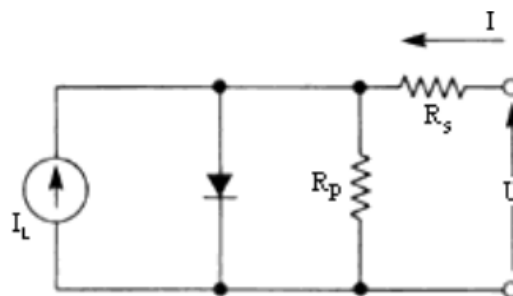
A német gyárban a végső összeszerelés során a megfelelő építőanyagra, esetünkben tetőcserépre kerül a napelem, ahová egy műgyanta alapú ragasztóval rögzítik, miután a cserép hátulján kivezték a két, a termelőhálózatra való csatlakoztatáshoz szükséges kontaktot. A gyártó az inverter előtt elhelyezendő elemekből a teljes rendszert adja. A cserepek hátuljára vevői igény szerint mikroinverter is felszerelhető, azon biztosan rögzíthető [19].

Természetesen léteznek más gyártástechnológiai megoldások is a panelekre. Amennyiben a kis tömeg fő szempont, van lehetőség üvegmentes gyártásra is. Ilyenkor a fő hordozó egy valamilyen kemény mag például alumínium vagy aramid. A hordozó Napra néző oldalában EVA-ba, vagy más átlátszó műanyagba (pl. epoxigyanta) ágyazva találhatók a waferek, a panelt ETFE lap zárja. Hátsó részét kompozit hátlap-hordozó-kompozit hátlap (hátlap lehet például üvegszálerősített epoxigyanta lap) szendvicslaminátum alkotja. Tulajdonságaik kedvezőek, de a mi esetünkben a kis tömeg nem szükséges, ezért maradhat az olcsóbb és egyszerűbb üveg alapú technológia [32].

1.7 Elektromos tulajdonságok, tesztelés, mérés

A napelem panel, mint azt korábban is láttuk, egy dióda. Megvilágítatlan állapotában ezért ugyanazt a viselkedést kapjuk, mintha egy általános szilíciumdiódát vizsgálnánk. A nyitófeszültség 0,5 V körüli, a letörési feszültség ~20 V környékén mérhető [13].

Megvilágított állapotban azonban már egy bonyolultabb összefüggést kapunk. Ennek magyarázatához szükségünk van a napelem helyettesítő áramkörére. Két fő matematikai modellt alkottak meg idáig: az ötparaméteres egydiódás és a hétparaméteres két diódás helyettesítő modellt. Bár az utóbbi pontosabb eredményeket ad, a modell megoldása sokkal több erőforrást és időt igényel. Mivel az idők során bizonyította helyességét és a valóságot jól leírja, elegendő számunkra az egydiódás helyettesítő modell (3. ábra) [33].



3. ábra: A napelem helyettesítő áramköre [8].

A modell tehát öt paramétert használ: a soros ellenállást, a párhuzamos ellenállást, a generált áramot, a dióda vissz irányú telítési áramát és a dióda idealitásának faktorát. A rendszer hőmérsékletfüggését a következő egyenlet fejezi ki:

$$V_t = \frac{k N_s T}{q} \quad (1)$$

Ahol k a Boltzman-állandó, N_s a sorba kötött napelem cellák száma, T a hőmérséklet [K], q pedig az elemi töltés. Ennek az összefüggésnek a bevezetésével a visszaram adta tag változik meg úgy, hogy az egész cellára meg lehet határozni azt [33].

Tegyük fel, hogy a megvilágítás nem változik. Ekkor az áramgenerátor folyamatosan ugyanakkora töltésadagot bocsát ki adott időközönként, tehát az áram állandó. Az áramgenerátorra jellemző, hogy az áramerősséget mindig fenntartatja, a feszültség folyamatos befolyásával. A kivezetési pontokon mérhető feszültség azonban sosem lehet nagyobb, mint a dióda nyitófeszültsége, hiszen ebben az esetben az kinyitna és az az áramkört rövidre zárná. A két ellenállás a cellában fellépő veszteségeket szimbolizálja. A párhuzamos, vagy söntellenállás a cella anyagában lévő hibákból adódik, ahol is a töltéshordozók alternatív útvonalakon visszajutnak a forráshoz, vagy rekombinálódnak. Ideális cellában ez az ellenállás végtelen nagy. A soros ellenállás a cellán belüli egyéb veszteségeket (kontaktellenállás, vezetési ellenállás) adja meg. Ideális esetben ez az ellenállás végtelenül kicsi [8,11].

Amennyiben a körre alkalmazzuk a Kirchoff-törvényeket, az alábbi összefüggést kapjuk:

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \quad (2)$$

Az egyes tagokat kifejezve olyan egyenleteket kaphatunk, amelyek csak a soros ellenállástól, a söntellenállástól és az idealitásfaktortól függ. Ez azért fontos, mert így, amennyiben szükséges, ezek az értékek a maximális teljesítményen lévő feszültségből és áramból, valamint a rövidzárási áramból és a kapocsfeszültségből matematikai úton kitűnő pontossággal számíthatók. Ezek a paraméterek elsősorban a hibadetektálásban játszhatnak kisebb szerepet [33].

A modell nem veszi figyelembe a napelem nagy felülete miatti kapacitív hatást [8], bár ezt csak akkor érdemes figyelembe venni, ha a tranziens hatásokat figyeljük. Mivel mi csak állandósult állapotban, egyenlő megvilágítás mellett mérünk, erre a faktorra nincs szükségünk.

A cella hatásfoka a teljesítménye mellett a legfontosabb jelzője. A hatásfok megadja, hogy a beérkező fény energiájából mennyit alakít át elektromos energiává. A hatásfok kiméréséhez szükség van egyéb mérésekre is, ezzel az I-U karakterisztika is meghatározásra kerül. A hatásfok (Power Conversion Efficiency - PCE) a következőképp adható meg:

$$PCE = \frac{P_{panel}}{P_{fény}} = \frac{J_{RZ} \cdot U_0 \cdot F_f}{P_{fény}} \quad (3)$$

Ahol $P_{f\acute{e}ny}$ a beérkező fénv egységnyi felületre vetített teljesítménye, J_{RZ} a rövidzárási áramsűrűség, U_0 a kapocsfeszültség, F_f pedig a kitöltési tényező (fill factor). J_{RZ} akkor mérhető, ha a két kivezetést összekötjük, ellenállás közbeiktatása nélkül, U_0 akkor mérhető, ha a feszültségmérőt a megvilágított, de nem bekötött cella kivezetéseire kötjük. F_f egy aránytényező, azt adja meg, hogy az ideális cella teljesítményéhez képest a valós cella teljesítménye mekkora arányban tér el. Ehhez mérni kell a maximális teljesítményre eső feszültséget és áramsűrűséget, terhelés beiktatásával. A képlet a következőképp alakul:

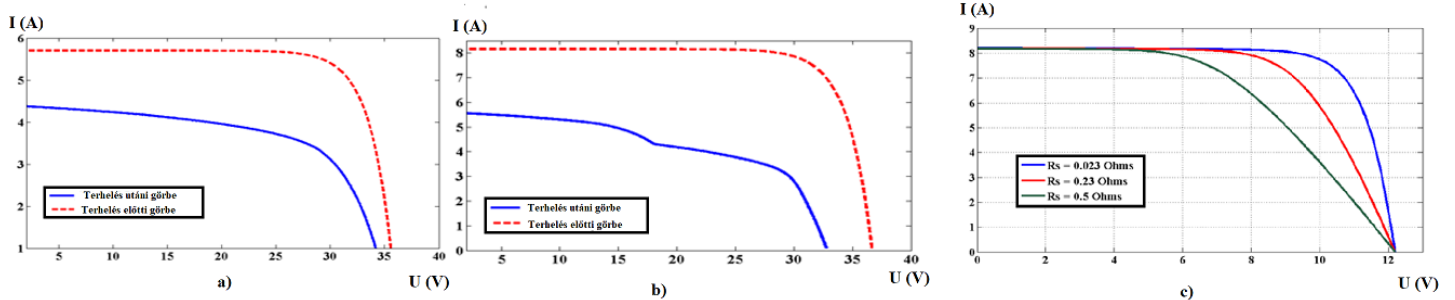
$$F_f = \frac{J_m \cdot U_m}{J_{RZ} \cdot U_0} \quad (4)$$

Ahol J_m és U_m a maximális teljesítményen mérhető áramsűrűség és feszültségértékek. E két utóbbi érték szorzatával adható meg a teljesítmény maximális értéke. Ez az érték mindig kisebb, mint a $J_{RZ}U_0$ szorzat [11]. A cella teljesítményéhez elég a rövidzárási és üres értékeket ismernünk, valamint a cellára jellemző F_f -et [11,20]:

$$P_{cella} = J_{RZ} \cdot U_0 \cdot F_f \cdot A \quad (5)$$

, ahol A a cella felülete. A teljesítményérték ugyan kicsinek adódik ($U_0 = 0,5 \text{ V}$, $J_{RZ} = 40 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$, $F_f = 0,8$ esetén egy 100 cm^2 felületű cella teljesítménye $1,6 \text{ W}$ lesz). de a feszültség több cella sorba kötésével, az áramerősség(sűrűség) párhuzamos kapcsolással növelhető [8]. Monokristályos rendszer esetén a cellafeszültség általában 12 V (24 sorba kötött cella), az általunk vizsgált cella átlagos munkaponti feszültsége 41 V körül alakul [20].

A paneleken több fajta mérést és tesztet is elvégezhetünk. Elsődleges paraméterezésre használható az üresjáratú értékek megmérése, terhelőellenállás változtatással kimérhető a munkapont és a Fill-factor is [11,20]. A panel tesztelésére alkalmas módszer még a villanó-teszt (flash-test) is, ami 1-2 másodperc alatti intenzív megvilágítás melletti, terhelés alatti mérést jelent. Amennyiben a cellában rendelleneségek mutatkoznak, akkor nemcsak a teljesítmény és a kitöltési tényező romlásából, hanem a görbe alakjából is következtethetünk erre, ráadásul a hiba okáról is árulkodó lehet a felvett lefutás. Ezek a helyettesítő modellből



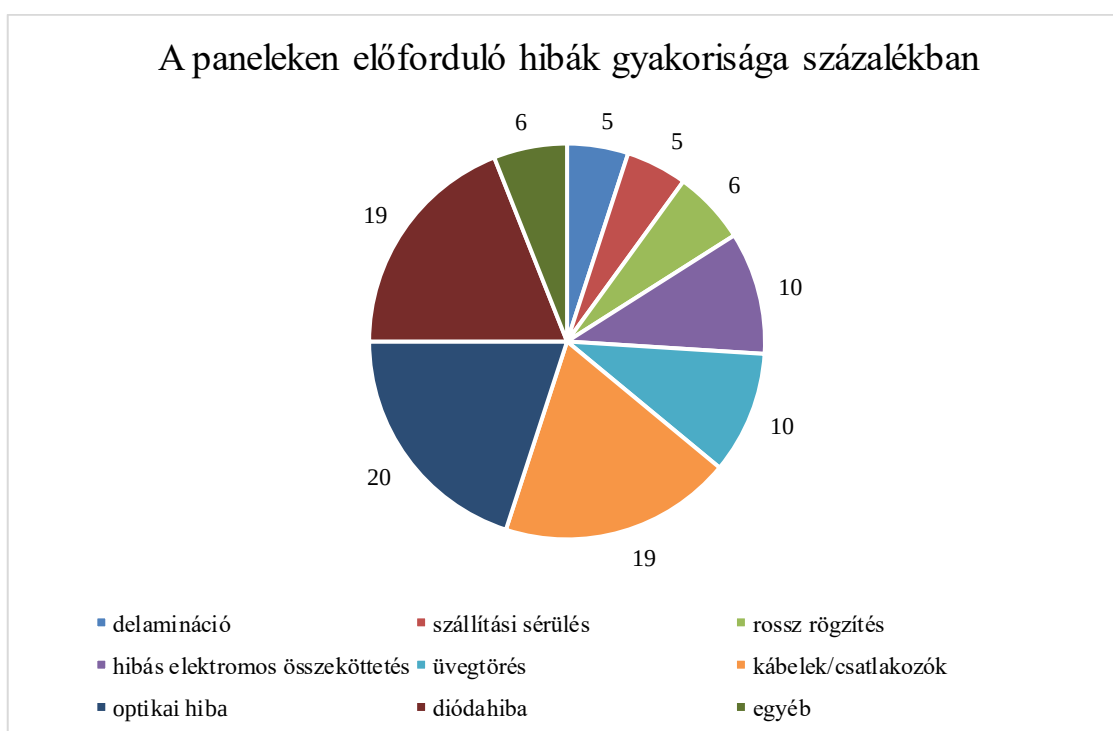
levezethetőek. Három fő típusú hibaokot lehet így megkeresni: az üveg homályosodása és az EVA sárgulása következtében a görbe az y tengely mentén lefelé mozdul (4.ábra, a)), a kontaktok és vezetők korróziója miatt megnövekedett ellenállás miatt a görbe lefutása élesebbé válik (4.ábra, c)) és a diódák sérülése miatt a lefutás során letöréseket észlelünk (4.ábra, b)) [29].

4. ábra: Az I-V karakterisztika lefutása különböző hibatípusok esetén: a) elszíneződés, b) diódahiba, c) soros ellenállás megnövekedése [35].

1.8 Környezeti behatások, hibaforrások

Az előbbiekben bemutatam a napelem cellák előnyeit, tulajdonságait és gyártását. Az elkészült panelek azonban ekkor még felszerelésre várnak. A felszerelés után pedig, hogy az előállítási költségek, valamint a környezetvédelmi szempontok találkozzanak, szükség van arra, hogy a panel bírja a használati körülményeket, azaz a környezeti behatásokat. Erre azért van szükség, mert bár a szilícium rendelkezésre áll, az elektronikai minőségű, különösen a napelem minőségű szilícium előállítása költséges és nem túl környezetkímélő (nagy hőmérséklet, elektromos energia és sok sósav szükséges) [21].

A napelem panelek leggyakoribb hibatípusait az 5. ábra mutatja be.



5. ábra: A napelemek leggyakoribb hibái [30].

Ezen hibák előfordulásához, a degradációhoz hozzájárul a környezeti sugárzás, a hőingás, a mechanikai terhelések és a kémiai terhelések összege. A mérések kivitelezésénél ezért számos dolgot érdemes figyelembe venni: a napelem technológiáját és rögzítési típusát (ezek adottak), a klímát, az adott égővön történő jellemző környezeti behatásokat, valamint a mérési pontatlanságot a tesztek során. Ezen paraméterek figyelembevételével, már meglévő szabványok alapján, vagy esetleges módosításokkal alakítottuk ki a mérési módszereket,

amelyek az élettartam, valamint a napelem korlátainak meghatározásában segít. A leggyakoribb hibatípusok közül a következőket tudjuk szimulálni [31]:

- Delamiáció – A laminált rétegek szétválása, amely hatására nedvesség képes diffundálni a rétegek közé
- Nedvesség okozta korrózió
- Kémiai behatások (savas, lúgos)
- Az EVA fólia termikus degradációja, ami elszíneződsként jelenik meg („sárgulás”)
- Mechanikai behatások okozta sérülések, belső és külső sérülések

A mérések során ezeket a külső behatásokat szimuláljuk és előtte-utána teljesítményméréssel kinérjük a degradáció mértékét, amiből az élettartamra lehet következtetni. A kutatási munka célja a különböző laminálási paraméterek hatásának vizsgálata a késztermék minőségére. A kísérleti eredmények alapján pedig cél a gyártástechnológia optimalása, az előállításhoz befektetett energia csökkentése mellett. A következő fejezetben bemutatom ezen mérésorozat módszereit és azokat a hatásokat, amit szimulálni hivatottak. Ezen kívül bemutatom a panelt alkotó alapanyagok teszteléséhez használt módszereket is.

2. Vizsgálati módszerek

2.1. Teljesítménymérés

A teljesítménymérés az alapvető kiértékelő módszer, amellyel a tesztek során a panelek állapotát tudjuk nyomon követni az elektromos tulajdonságaik alapján.

A teljesítménymérés során a panel egységes megvilágítás alá kerül, amit műterheléssel és üresjáratban is mérünk. Lehet folyamatos, vagy pillanatszerű (flash) módban is mérni, mi az előbbit használjuk. Az alapvető paraméterezés (I-V görbék, munkaponti teljesítmény) mellett összehasonlító módszerrel megmutatható a cellák degradációja. Saját fejlesztésű műszerrel mérünk.

A mérés alapja az IEC 60904-3 4.0-ás verziója. A szabvány alapján a mérést 1000 w/m^2 , 1,5 AM (Air Mass-légkörre jellemző tisztasági és pozíciós tényező, amely az egyenlítőnél, tiszta levegő mellett 1-et vesz fel, $41,8^\circ$ -on tiszta levegő mellett nyárra jellemző érték) megvilágítással, folytonos (fehér fényű) LED-ekkel végezzük, 25°C -ra termosztált csarnokban. A cellák hőmérsékletét úgy állítjuk be, hogy azokat a mérés előtt minimum fél óráig a laboron belül tároljuk. A nyomonkövetés érdekében minden cella egyedi sorszámot kap, ami a beérkezési dátumból és az aktuális darab számából áll, például: 20220930_01. Az I-V görbét egy pásztázó műterhelés segítségével tudjuk felvenni.

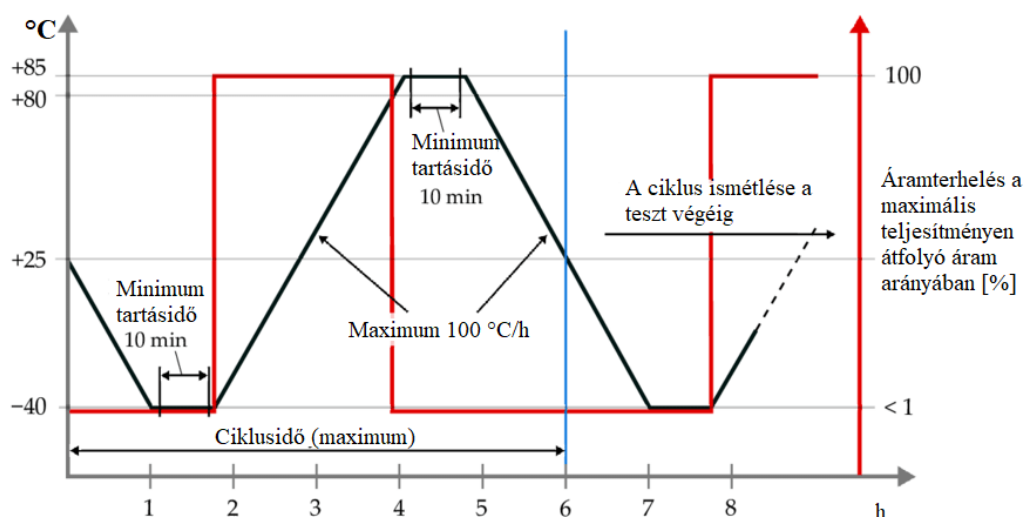
2.2. Kémiai ellenállóképesség vizsgálata

A vizsgálat célja, hogy a paneleken szimuláljuk a külső savas, illetve lúgos hatásokat. Alapja az EN ISO 10545-13:2016 szabvány. Ezek a hatások a működés során elsősorban a savas esők, valamint a madárürülékkel kerülnek a panelre. A hatás szinte csak az üvegen érvényesül, ott is akkor, ha a behatás tartós. A felhasznált üveg nem különösebben ellenálló, hagyományos építési edzett üveg. Ebből fakadóan alkálivesztesége nagy, az erős lúgok, valamint a hosszú ideig a felületre jutó és onnan elpárolgó víz korrodálja az üvegfelületet. Ez körülbelül 1-2 ezred milliméter mélységet jelent, itt az üveg először csillogni kezd, később pedig teljes lebomlás következik be, az üvegen rotszerű kristályok válnak ki. A fő probléma ezzel az üvegfelület megnövekvő visszaverési képessége, ami azt eredményezi, hogy kevesebb fény jut a szilíciumlapra. Látható, hogy jelentős teljesítménycsökkenés történik meg a folyamat során, ezért fontos az üveg ellenállóképességének mérése. A kísérletet /mely a határfelület

összeomlását és az ioncserét is kiváltja/ a következőképp végezzük: 45 mm átmérőjű Poli-vinil-klorid (PVC) csődarabokat helyezünk a panel felületére, azokat megfelelően tömítjük, majd négy, két savas és két lúgos oldatot öntünk beléjük: 3 és 18 V/V%-os sósav (HCl) oldatokat, valamint 30 g/l és 100 g/l koncentrációjú nátrium-hidroxid (NaOH) oldatokat. Az oldatok 96 órán keresztül maradnak a cellán, utána desztillált vizes mosással eltávolítjuk a sav, illetve lúgnyomokat. A panelek teljesítményét mérjük a korróziós tesztek előtt és után, valamint a vizuális megítélést helyettesítendő, színinger jellemzők meghatározásán keresztül következtetünk az edzett üvegek korróziós hajlamára [23,27].

2.3. Klímakamrás vizsgálat

A legtöbb információt ezzel a méréstípussal szerezhetjük a panelek termikus behatás okozta degradációs hajlamáról. A módszer meleg-párás és hideg kamrákból áll, melyekbe adott időtartamokra kell behelyezni a paneleket. Az első esetben technikai limitációk miatt az alapul szolgáló IEC 61215 szabvány hőmérsékleti profilját (6. ábra) módosítani kellett, az eredeti 10 perces tartó -40°C és szintén 10 perces 80°C -os ciklusok helyett egy, a négyfokozatú egyszerűsített Keoppen–Geiger skála szerinti enyhe kategória figyelembevételével kialakított programot terveztünk meg [34]: 72 óra melegpárás, 60°C -os, 24 óra -20°C -os, száraz ciklusba helyezzük be a paneleket. További egyszerűsítés volt az áramterhelés elhagyása.



6. ábra: Az IEC 61215 eredeti hőmérsékletprofilja [34].

A melegpárás kamrán belül folyamatos UV világítást alkalmazunk. Ezt egy hónapon keresztül végezzük, végül a paneleket megvizsgáljuk, különös tekintettel a hőingás okozta sérülésekre, repedésekre és delaminációra. A hőmérséklet mellett a páratartalom és a magas hőmérséklet az

üvegfelületre leoldó-roncsoló hatással van. Bár az UV sugárzás nagy részét az üveg visszaveri, a műanyag részekre, így a fóliára különösen roncsoló hatást fejt ki, erre is tekintettel kell lenni a vizsgálat során. Az élettartamra a legjobban előtte-utána teljesítményméréssel lehet következtetni [24,25]. Miután az első ilyen vizsgálat érzékelhető eredményt nem hozott, módosítottunk a cikluson. A ciklusok egységesen 24 órák lettek, a hőmérséklettartományt - 20°C-105°C-ra állítottuk be. A kísérlet 1 hónapig tartott. A második esetben pedig követtük az IEC61215 szabványban megadott paramétereket, majd a kombinált klímakamrás tesztek előtt és azt követően is meghatároztuk a kitöltési tényezőket.

2.4. Mechanikai ellenállóképesség 1. – Ütőszilárdság

A vizsgálat során az egyszeri, rövid erőbehatás cellára gyakorolt hatását vizsgáljuk. A pillanatnyi erőhatás okozta degradációból következtetni lehet a panel mechanikai szilárdságára. A mérést az EN 14617-9 szabvány módosításával végezzük: ejtőcsöves módszert alkalmazunk, amely során egy csőben egy 2,2 kg tömegű, 83 mm átmérőjű acélgolyót ejtünk le, az ejtési magasságot 5 cm-ként növelve. Az ütőszilárdságot ekkor a következő képlet adja meg:

$$L = m \cdot g \cdot h \quad (6)$$

Ahol: L az ütőszilárdság (J), m az acélgolyó tömege (kg), h az a magasság (m), ahol a próbatest eltörik és g a nehézségi gyorsulás $= 9,806 \text{ m/s}^2$. A cellát a kísérlet közben homokágyra helyezzük, a homok szemcsemérete 1-2 mm, a szemcsék gömbszimmetrikusak. A különböző ejtési magasságokból fakadó degradáció mértékét a kitöltési tényező meghatározásán keresztül állapítottam meg [23].

2.5. Mechanikai ellenállóképesség 2. - Pontszerű terheléssel szembeni ellenállóképesség

A vizsgálat célja a cella makroszilárdságának mérése, pontszerű terheléssel szemben. A mérés során a pontszerű terhelés okozta degradáció és a teljesítmény összefüggését, valamint az üvegtábla anyagi minőségét vizsgáljuk. A mérés során az cellát egy szakítógépet (Instron 250kN) terheli pontszerűen. Egy pontban 1, 5 és 10 párhuzamos mérést végzünk, közben mérjük a nyomóerőt, amit akkor jegyzünk fel, ha az üveg esetleg eltörik. A maximális nyomóerőt 1,25 kN-ban határoztuk meg, mert a korábbi vizsgálatok alapján ennél az erőnél az üveg még pont nem törik el, és a fő célunk nem az üveg törésének megfigyelése, hanem a cella sorozatos vagy dinamikus erőhatással szemben mutatott válaszána kimérése. Degradáló, de nem destruktív

vizsgálat (a wafer nem válik használhatatlanná), ezért a terhelések után visszamértük a panelek teljesítményét. A vizsgálattal különböző környezeti hatásokat (jégeső) modellezzük. Az EN 12825:2001 szabvány mérési módszerét használjuk.

2.6. Mechanikai ellenállóképesség 3. - Statikus terheléssel szembeni ellenállóképesség

A mérés kivitelezése teljesen analóg módon történik az előző alponthan ismertetett méréssel, a fő különbség az, hogy a pontszerű terhelőfeltét helyett egy 15 cm átmérőjű acélpogácsával nyomjuk a panel felületét. Ezzel a nagy felületű terhelések (egymásra pakolás, hórétteg) hatásait szimuláltuk. Az EN 12825:2001 szabvány mérési módszerét használjuk.

2.7. Műszeres színmérés

Kiegészítő mérés, amely a klímakamrás öregítési vizsgálatokhoz, valamint a kémiai ellenállóképességvizsgálatokhoz kapcsolódik. A fő cél az, hogy meg lehessen határozni az öregítés során fellépő színváltozás és a cella teljesítményváltozásának összefüggését. Ehhez egy olyan műszert alkalmazunk, amely a CIE 1971 színrendszert és a CIELab környezetet használja. A módszert akkor lehet alkalmazni, ha a színek csak kis mértékben térnek el egymástól, de már érzékelhetők. A rendszer a valós RGB helyett virtuális alapszíneket vezet be, melyek a valós alapszínek lineáris kombinációi. A CIELab környezet a receptorokat modellezi, alapja az, hogy egy szín nem lehet egyszerre a szín maga és annak ellentét színe, ezért minden szín megadható egy háromdimenziós koordináta-rendszerben. Az „a” koordináta a piros-zöld arányt, a „b” koordináta a sárga-kék arányt adja meg, az „L” koordináta a világosságot. A színbeli különbség az etalonhoz képesti eltolódása adja meg a színváltozás mértékét. A mérések kivitelezéséhez Konica Minolta CM3600d típusú műszert használtunk [28].

2.8. Mikrokeménység meghatározása

A mérés elsődleges célja a panelt fedő üvegtábla mikrokeménységének meghatározása. A mérést Vickers-módszerrel végezzük. A méréshez egy olyan gyémántból készült négyzet alapú gúlát használunk, amelyben a szemközti oldalak által bezárt szög $135,95^\circ$. Egy lépéses vizsgálat, melynek során a gúlát fix erővel nyomjuk a minta felületébe, ami ott jellegzetes

négyszög alakú nyomot hagy. A benyomódás méretének ismeretében számítható az adott anyag Vickers-féle mikrokeménysége, az alábbi módon:

$$H_V = \frac{F}{A} = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (7)$$

Az anyagok mechanikai tulajdonságait nagyban befolyásolják mikroszerkezeti tulajdonságaik. Minél puhább az üveg, annál több kristályhiba és zárvány található benne, amelyek ronthatnak az ellenállóképességén [23]. A mérésekhez Wolpert Group Micro-Vickers Hardness Tester 402MVD típusú műszert használunk, a gúla által hagyott nyom átlóit digitális fénymikroszkóppal mérjük.

2.9. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok

Az összetétel meghatározásához pásztázó elektronmikroszkópot (SEM) (FEI/ThermoFisher Apreo S LoVac) használtunk, EDAX Ametek Octane Elect Plus feltétellel, amivel az energiadisziperzív röntgenanalízist tudtuk elvégezni. A SEM lényege, hogy a vákuumban elhelyezett mintára egy elektronnyalábot bocsájtunk és a kölcsönhatás eredményeként kapott jeleket detektáljuk. A detektor megválasztásától függ, hogy az anyag mely fizikai paraméterét jelenítjük meg. A szekunder elektron (SE – secunder electron) detektorokkal a felület morfológiáját, a visszaszórt elektronokkal (BSE – back-scattered electron) rendszámkontrasztos képet kapunk. Az EDAX (energiadisziperzív röntgen spektrométer) detektor alkalmazásával a mintán kiválasztott területen vagy pontban lokális összetételmérést is végezhetünk az elektronsugár által kiváltott karakterisztikus röntgenfotonok energiájának és intenzitásának mérésén keresztül, amivel mennyiségi és minőségi analízist is végezhetünk. [22].

2.10. Fényáteresztő képesség

Egyszerű spektrofotometriás vizsgálat, melynek fő célja a monokromatikus fény intenzitásának mérése. Amennyiben levegőre vonatkoztatva mérünk vele, az adott anyag (üveg, esetleg kipolimerizált EVA) fényáteresztő képessége százalékban kifejezhetővé válik. Nagy érzékenységű, gyors, olcsó vizsgálat. A méréshez Avaspec 2048 (standard száloptika, 200-1100 nm effektív méréstartomány) típusú műszert használtunk. [24]

2.11. Fénymikroszkópos vizsgálat

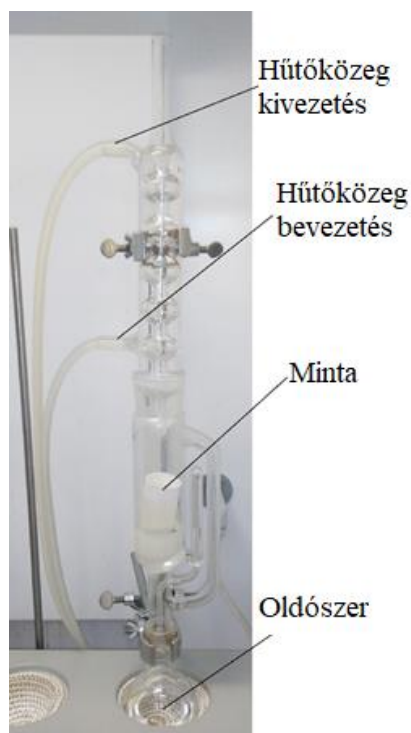
A méréseket KEYENCE VHX-2000 digitális fénymikroszkóppal végeztük. A műszer képes akár 10 µm-es felbontásra, érintkezésmentesen, tárgylemez nélkül vizsgálhatók a felületek, automata kalibrálás és a mélységélesség korrekció mind a műszer mellett szól a hagyományos fénymikroszkóppal szemben.

2.12. Fourier-transzformációs Infravörös spektroszkópia

Az infravörös spektroszkópiás vizsgálat (FT-IR – Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia) az infravörös tartományban végbemenő abszorpción alapul. A vizsgált mintát tartalmazó molekulákon belüli funkciós csoportok forgási (rotációs) és rezgési (vibrációs) energiaátmeneteire jellemző az infravörös színtartományban történő elnyelés. A rezgési spektroszkópiai módszerekkel a csoportfrekvenciákon keresztül a molekula felépítéséről és szerkezetéről is információt nyerhetünk. A mérésekhez PerkinElmerSpectrum TWO FT-IR típusú spektrométert használtunk.

2.2.5 Polimerizációfok mérése-Soxhlet-extrakció

Módszerünk oldhatóságvizsgálaton alapul: a nem polimerizálódott molekulákat toluollal kioldjuk, így a minta száraz tömege csökkenni fog. A mérést Soxhlet-extrakciós módszerrel végezzük. Az eljárás az extrakciós eljárások között a perkolációs módszerekbe sorolható, ami azt jelenti, hogy az oldószer átesöpög a vizsgált mintán. A folyamatos oldószerellátást egy fűtött lombik biztosítja, ahová az oldott anyaggal telített oldószer befolyik, de onnan a forralás során csak a tiszta oldószer távozik, ami a kondenzátoron lecsöpög a mintára (7. ábra). A mérést 24 órán át végezzük. Elsősorban kiegészítő szerepű, a paraméterek optimalizálására, az EVA minősítésére és a hibaanalízis során használjuk [35].



7. ábra: A Soxhlet-extraktor felépítése

2.2.6 Polimerizációfok mérése-Kalorimetriás módszer

A polimerizációfok másik mérési módszere a differenciális kalorimetria. A módszer lényege, hogy két cellát, egy ismert hőkapacitású referenciát és a minta egy darabját melegítjük. A cellákhoz saját fűtőszálak is tartoznak, amelyek a hőmérsékletet igyekeznek kiegyenlíteni abban az esetben, ha a minta és a referencia hőmérséklete nem egyezik meg. A hőforgalom mérhető, a kapott görbéből (hőforgalom-hőmérséklet) pedig következtetéseket vonhatunk le az anyagban lejátszódó folyamatokról. A felfűtési profil lineáris. Kiegészítő, hibadetektáló mérés [36].

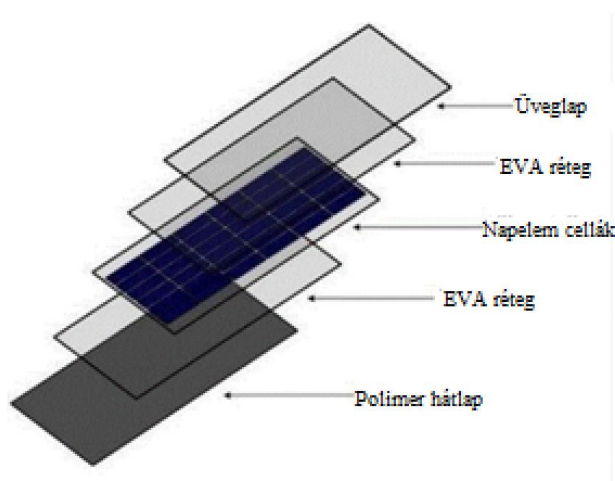
3. Vizsgálati eredmények és értékelésük

A tetőcserépre integrálható napelem közül két különböző gyártási receptúrával gyártott terméket vizsgáltunk. Az első esetben a laminálási hőmérséklet a laminátor első zónájában 150 °C, míg a második zónában 160 °C, ahol a teljes tartózkodási idő 720 másodperc volt. A második esetben a hőmérsékleti értékeken nem változtattunk, csupán a tartózkodási időt csökkentettük zónánként 100-100 másodpercre, valamint változtattuk a rétegeket összefogó

ragasztóanyagot. Az alapanyagok részletes vizsgálatának célja a különböző környezeti tesztek hatására esetlegesen kialakuló degradáció feltárásának segítése.

3.1 Az alapanyagok tesztje

A napelemeket több alkotórészből állítják össze az „1.6 A monokristályos cella gyártástechnológiája” című fejezetben bemutatott módon, melynek végterméke a laminált cella. Ahhoz, hogy a napelemet, mint egészt vizsgálni tudjuk, szükség van az alkatrészek egyéni vizsgálatára, mert ezáltal feltárhatók a végtermék későbbi gyengeségei, valamint segíthetünk a beszállítói minőségbiztosításban. A tetőcserépre szerelt panel a következőképp épül fel (lásd a 8. ábrát): üveglap, EVA fólia, szilíciumlapkák, az azokat összekötő ribbonok és a hátlap. Ezeknek a vizsgálati módszereit és az eredményeinket mutatom be a következő pontokban.



8. ábra: a tetőcserépre integrálható napelem felépítése [5].

3.1.1 Az üveg vizsgálata

Az üveglap vizsgálata azért fontos, mert ez az elem végzi a cella fő védelmét és áll elsőként a behatoló fény útjába. A mérések célja az üveg összetételének, mikrokeménységének és fényáteresztő képességének meghatározása volt. A mérés során kapott eredményeket az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: Az energiadiszperzív röntgenanalízis eredménye.

Elem	Tömeg %	Atom %	Hiba %
O	44.16	57.44	8.31
Na	13.06	11.83	7.66
Mg	2.69	2.3	8.3
Al	0.94	0.72	10.19
Si	33.22	24.62	4.15
Ca	5.88	3.05	3.55

Az összetétel alapján az üveglap egy edzett mésznátron üveg. A mikrokeménységét Vickers-módszerrel mértük. A mérések eredményét a 2. táblázat foglalja össze.

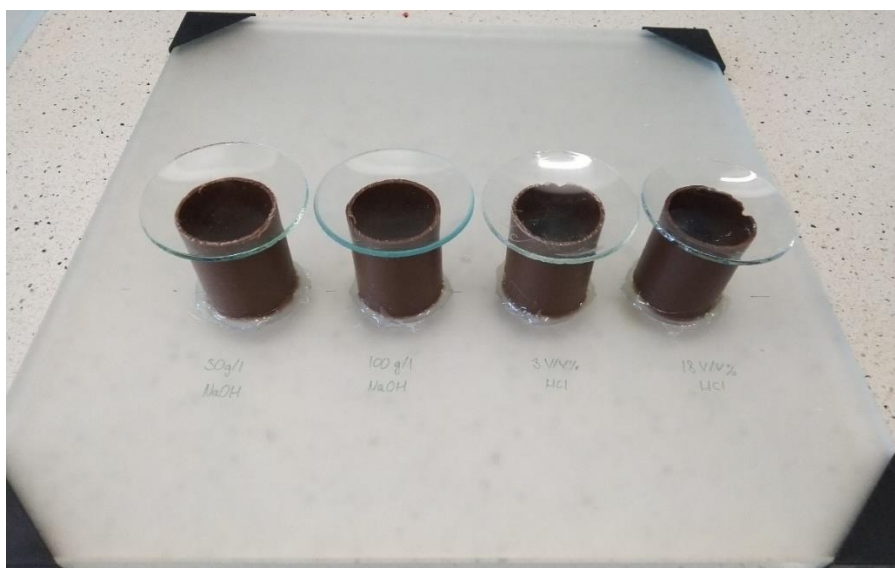
2. táblázat: A Vickers-keménységmérési módszer eredményei.

Mérési pont	HV 0.2
1	505
2	495
3	501
4	498
5	499
Átlag:	499.6
Szórás:	3.71

Megállapítható, hogy az üveglap erős, szívós, nagy keménységű edzést kapott, a célnak megfelelő.

Az üveg fényáteresztő képességének mérése a napelem alapvető működése miatt fontos, hiszen a látható fény energiáját tudja elektromos energiává alakítani. A levegőhöz képest ez a képesség ezen a tartományon kb. 70-75%. A méréshez AVASPEC 5.4 környezetet használtunk, amely 500-700 nm hullámhosszra kalibráltunk, 100%-os érték a levegő. A fényáteresztés mértékének csökkenése az üveglap vastagságára (3 mm) és annak struktúrált felületére vezethető vissza. Az üveglap a ragasztóanyag (EVA) felé eső oldala durva felületű, ezáltal nagyobb felületen képes tapadni az alkalmazott ragasztóanyag.

Mivel az üveglap a cella kémiai behatásoknak leginkább kitett része, ezért szükséges ellenállóképességvizsgálat. Ezt a „2.2. Kémiai ellenállóképesség vizsgálata” című alfejezetnek megfelelően végeztük. A mérési elrendezést a 9. ábra szemlélteti.

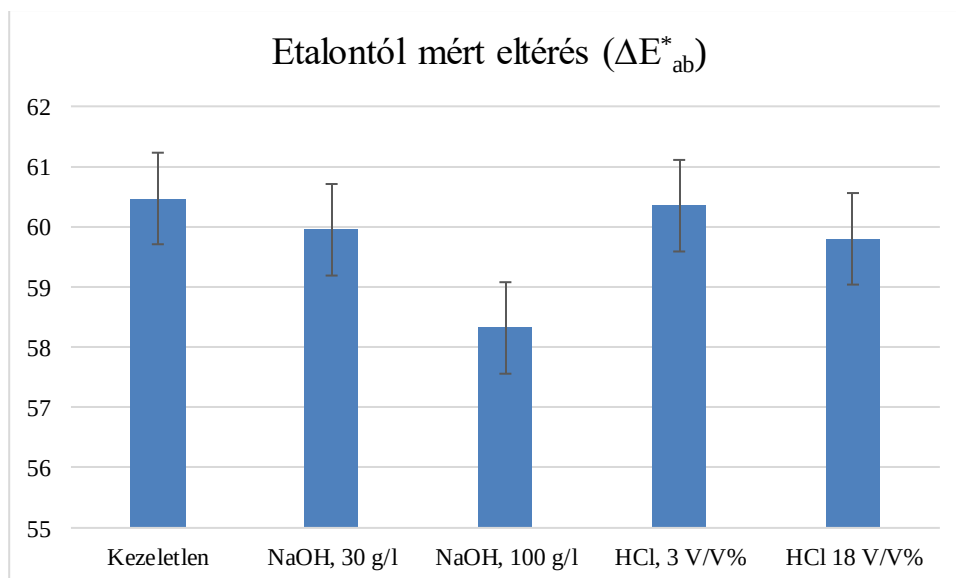


9. ábra: Az üvegtábla kémiai ellenállóképesség vizsgálata.

A korróziós jelenség vizuális megítélése nem vezetett eredményre, ezért mértük az igénybevételnek kitett helyeken a színíngert jellemzőket. A mérés során kapott adatok szerint pontosan megadható a kezeletlen felülethez képest bekövetkező színeltérés, amelyet a 3. táblázat foglal össze.

3. táblázat: Az üveglap színíngert eltérései az etalontól. Minden érték két különböző helyen végzett mérés átlaga.

Minta	Etalontól mért eltérés (ΔE^*_{ab})
Kezeletlen	60,47
NaOH, 30 g/l	59,95
NaOH, 100 g/l	58,32
HCl, 3 V/V%	60,35
HCl 18 V/V%	59,80

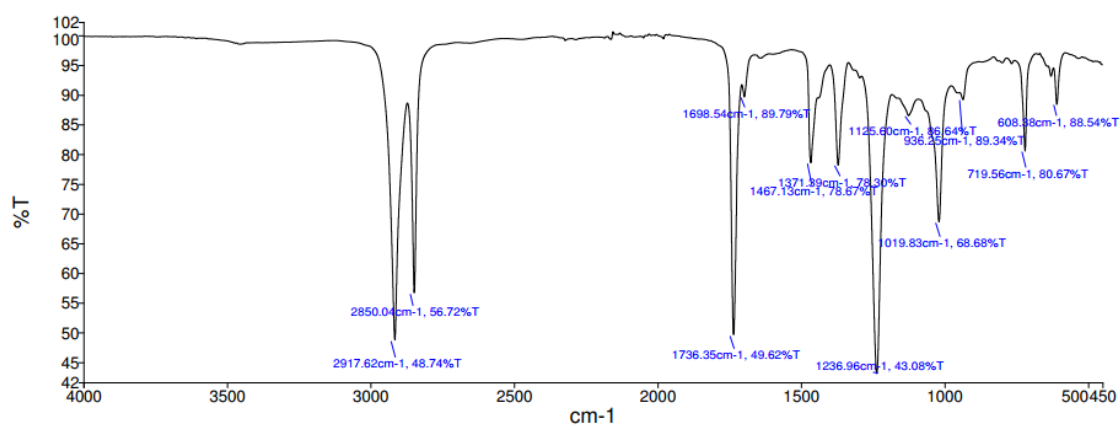


10. ábra: A színinger eredmények grafikusan, szórás hibájának feltüntetésével.

Megállapítható, hogy a színingerkülönbség nem jelentős, az üveg ellenállóképessége a kémiai behatásokkal szemben nagy.

3.1.2 Polimer fóliák vizsgálata

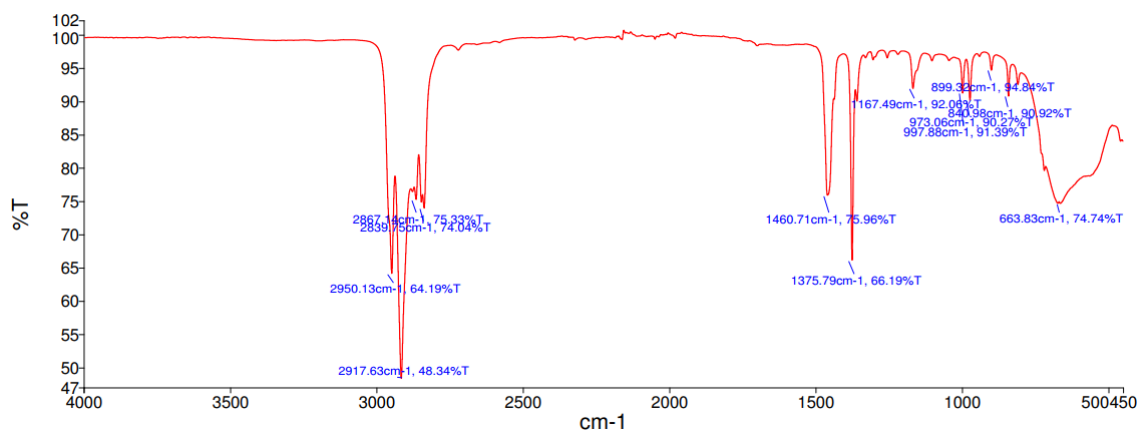
Az EVA fólia összetételét FTIR módszerrel (leírását lásd a „2.12. Fourier-transzformációs Infravörös spektroszkópia” alfejezetben), az azonosítást szoftveres könyvtárból végeztük (11. ábra).



11. ábra: EVA fólia FTIR spektruma.

A spektrumból megállapítható, hogy az EVA fólia összetétele 28-78 m/m% etilén-vinil-acetát kopolimer.

A hátlap fólia összetételének meghatározását szintén FTIR módszerrel, az azonosítást szoftveres könyvtárból végeztük (12. ábra).



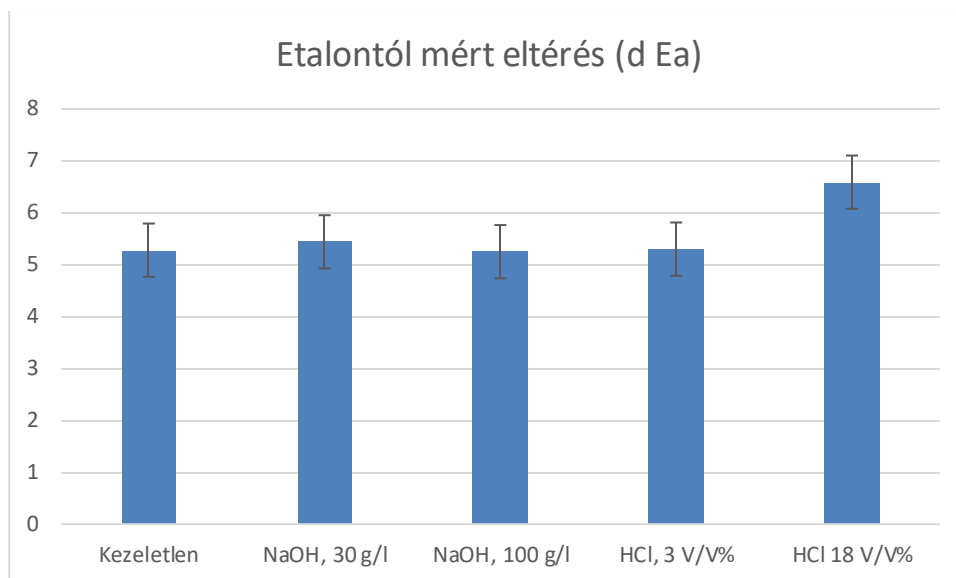
12.ábra: A hátlap FTIR spektruma.

Ez alapján elmondható, hogy a hátlap anyaga izotaktikus polipropilén.

A hátlap fólia az üveghez hasonlóan szintén ki van téve a kémiai behatásoknak. Ez elsősorban párás időben jelent problémát: a pára a cserép és a cella között csapódik le és vihet magával olyan komponenseket, amelyek megtámadhatják a hátlapot. A korróziós teszt eredményei:

4. táblázat: Az üveglap színinger eltérései az etalontól. Minden érték két különböző helyen végzett mérés átlaga.

Minta	Etalontól mért eltérés (d E _a)
Kezeletlen	5,28
NaOH, 30 g/l	5,44
NaOH, 100 g/l	5,25
HCl, 3 V/V%	5,3
HCl 18 V/V%	6,59

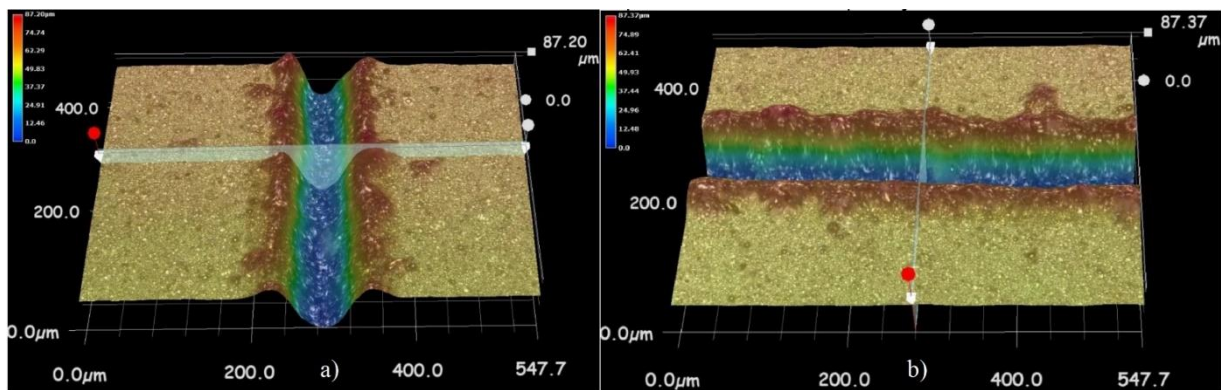


13. ábra: A színinger eredmények grafikusan, szórás hibájának feltüntetésével.

Megállapítható, hogy a színingerkülönbség nem túl nagy, a négy mérésből háromban nem jelentős ez a változás. Egyedül a tömény sósav esetén lesz alig látható változás, a fólia ellenállóképessége a kémiai behatásokkal szemben nagy, a megfelelő védelmet biztosítani tudja majd.

3.1.3 A perforált waferek vizsgálata

Magát a beérkező wafert a gyártás előtt méretre kell vágni és a darabokat stringekké összeforrasztani. A darabolás lézervágó gép segítségével történik. A vizsgálat célja, hogy a bevágás pontos profilját és a keménységre gyakorolt hatását megvizsgáljuk. Először a vágási profilt határoztuk meg digitális fénymikroszkóppal (14. ábra), mely alapján elmondhatjuk, hogy a vágási profilok a waferek teljes felületén konzisztensek. A mérési eredményeket az 5. táblázat foglalja össze.



14.ábra: A lézervágás profilja a (a) hosszú él és a (b) rövid él mentén.

5. táblázat: A lézervágás mért értékei. Az átlagok és a szórás 5-5 adatpontból kerültek meghatározásra (rövid és hosszú élekből).

	Mélység [μm]:	Szélesség [μm]:
Átlag:	53.55	72.74
Szórás:	3.24	4.35

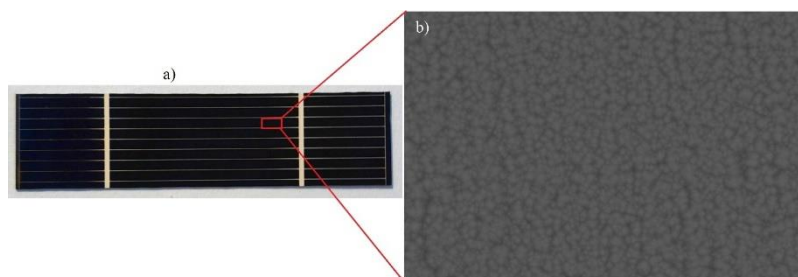
Vizsgáltuk továbbá azt, hogy van-e bármilyen hatással a lézervágás a wafer szilárdságára, okoz-e a módszer felkeményedést. Ez azért fontos, mert a lézervágás során nagy hőhatás éri a cellát, amely mikroszerkezeti változásokat hoz létre a szilíciumlapkában. Ez azért jelenthet gondot, mert az amúgy is törékeny és rideg lapka még keményebbé és ridegebbé válhat, amely így még könnyebben törik, valamint a szerkezeti változással a hatásfok jelentősen romolhat. Ezt Vickers keménységmérővel határoztuk meg, oly módon, hogy a vágott él felől a wafer belseje felé több ponton mértük a keménységet. A vizsgálat eredményeit a 6. táblázat foglalja össze.

6. táblázat: A perforált wafer átlagos keménységi értékei. Minden átlaghoz öt mérési pont tartozik

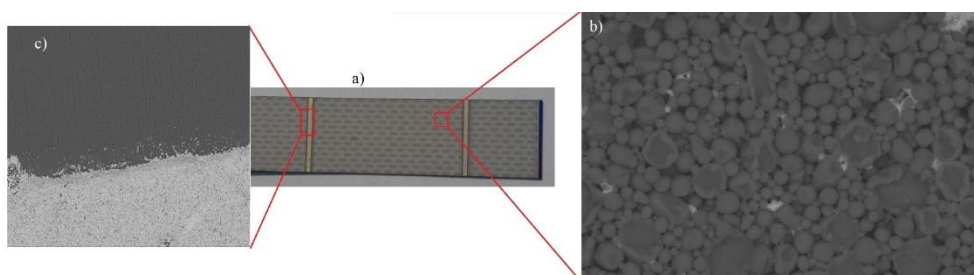
Mérési pont	HV (0,1 kp)	Mérési pont	HV (0,1 kp)
1-es sarok hosszú él Átlag	722,6	2-es sarok hosszú él Átlag	795,4
1-es sarok rövid él Átlag	770,8	2-es sarok rövid él Átlag	813,4
Középső él Átlag	740,4	Középső él Átlag	824

Megállapíthatjuk, hogy a mikrokeménység változása nem jelentős, így nem kell mechanikai gyengüléstől tartani.

A waferek mikroszerkezetét és elemi összetételét pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk. A mérésekhez 20 kV gyorsító feszültséget használtunk és rendszámkontrasztos felvételeket készítettünk. A wafer első oldalának mikroszerkezetét a 15. ábra, a hátsó oldal morfológiáját a 16. ábra szemlélteti, míg az elemi összetételüket a 7. táblázat foglalja össze.



15. ábra: A wafer kék oldala (a) és az arról készült SEM felvétel (b)



16. ábra: A wafer hátoldala (a), az arról készült SEM felvétel (b) és a vezetősínről készült SEM felvétel (c).

7. táblázat: A wafer EDAX elemzéséből származó elemösszetétel.

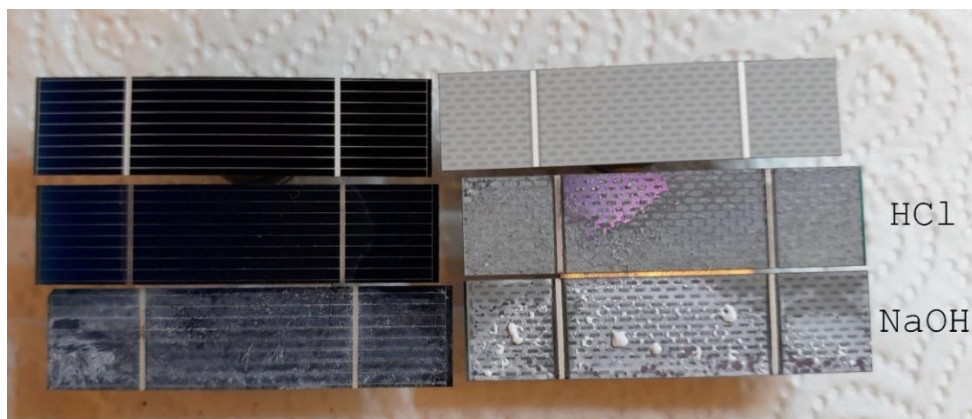
	Atom%						
Minta	Si	N	Al	O	Ag	Mg	Pb
Kék oldal	83,61	8,08	0,75	7,55	0	0	0
Fehér oldal	3,44	0	90,39	6,16	0	0	0
Vezetősín	3,55	0	0	5,15	88,60	1,27	1,43

Megállapítható, hogy a felületen az uralkodó elem a szilícium, melyen vékony, a működést nem befolyásoló oxidréteg képződött. A nitrogén és az alumínium mint szennyezők jelennek meg, nincs tükröződés gátló felület kialakítva, akkor a N atomaránya nagyobb kell, hogy legyen. Ezt a funkciót passzív kialakítással érik el: a szennyezés során apró gúlak alakulnak ki, amelyek segítik a fény tükröződését és szórását csökkenteni (15/b. ábra).

A hátsó fehér bevonat alumínium némi oxigénnyommal, a szilícium „átlátszik” a gerjesztési térfogat mélysége miatt. A választás megfelelő: a fém könnyű, jó stabilitást adó bevonatot képez.

A vezetősín összetételben az ezüst dominál, némi oxigén, magnézium és szilícium jelenléte mellett. Az ezüst kitűnő választás, mert a fémek között az egyik legkisebb fajlagos ellenállással rendelkezik.

Drasztikus esetben, amennyiben a cella delaminációt szenved, a kémiai behatásokért felelős anyagok (savas/lúgos) beszökhetnek és így direkt károsíthatják a wafereket. A savas/lúgos behatások modellezését ugyanazon módszerrel végeztük, mint a napelem egészenél, azzal a különbséggel, hogy itt a mintákra csak felcseppentettük a savat és a lúgot (17. ábra). A mintákat 96 órás korróziós igénybevétel után vizsgáltuk pásztázó elektronmikroszkóppal. A kiértékelés során a töményebb anyagok (100 g/l NaOH és 18 V/V% HCl) kerülnek bemutatásra (a hígabb anyagok esetén a hatás teljes mértékben ugyanolyan volt, de kisebb intenzitással jelent meg a felületen).



17. ábra: Az ép, illetve a maró anyagoknak kitett waferek.

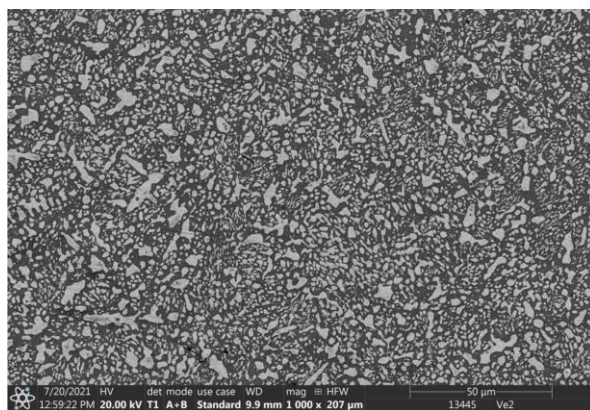
A sósavas teszt végén a kék oldal mattá vált, a fehér oldalon fehérös kiválás jelent meg. Az elektronmikroszkópos vizsgálat a kék oldalon tűs kristályokat és izometrikus szemcséket mutatott. Ezek, az EDAX vizsgálat alapján ólom-klorid (PbCl_2) (tűkristály) és ezüst-klorid (AgCl) (szemcse). Ezek mind a vezetősínből származnak. A fehér oldalon darabos Al-Cl-O tartalmú anyag vált ki.

A NaOH hatására mindkét oldalon fehér kiválás jelent meg. A kék oldalon szál-szerű kristályok, a fehér oldalon nagy felületű, összefüggő kiválás mérhető. Az EDAX analízis alapján a kék oldali kiválás nátrium-oxid-hidroxid, a fehér oldalon pedig nátrium-aluminát.

Ezek a kiválások több problémát jelenthetnek: egyrészt, bár magát a wafert nem, a hátlapot és a forrasztási anyagot fogyasztják. Ez valós esetben a mechanikai stabilitás elvesztését vagy elektromos szakadást eredményezhetnek. Másrészt a kiválások a fény útjába kerülnek, így a cella hatásfoka csökkenni fog. Ezért különösen fontos a delamináció elleni védekezés.

3.1.4 A ribbonok vizsgálata:

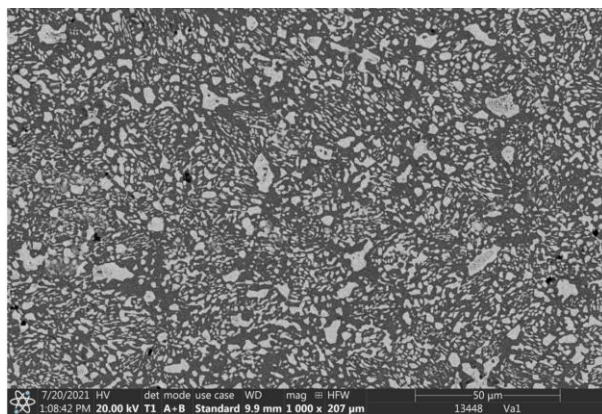
A napelemek esetén a ribbonok jelentik az elektromos összeköttetést. Vizsgálataink célja az összetétel és a mechanikai ellenállóképesség vizsgálata volt. Két mintánk van, egy vastag 2,3 mm-es (ezt a cellamátrix kialakításánál használják) és egy vékony 0,8 mm-es (ezt a stringek összeforrasztásánál használják). Az összetétel meghatározását pásztázó elektronmikroszkóppal végeztük. A mintát előkészítettük oly módon, hogy azt előtte áttöröltük etanollal átitatott szálmentes törölkendővel. A vizsgálat eredményeit a 18. és 19. ábra, valamint a 8. és 9. táblázat foglalja össze.



18. ábra: A vékony ribbon SEM felvétele.

8. táblázat: A vékony ribbon elemösszetétele.

Elem	Tömeg %	Atom %	Hiba %
Al	0.5	2.44	20.71
Si	0.49	2.28	19.3
Sn	66.73	73.83	3.15
Cu	0.69	1.43	36.88
Pb	31.59	20.02	12.47



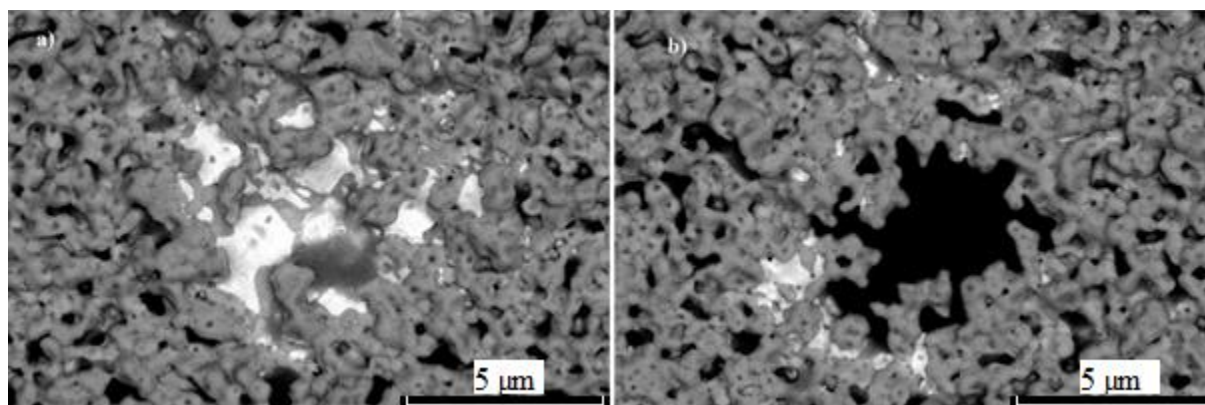
19. ábra: A vastag ribbon SEM felvétele.

9. táblázat: A vastag ribbon elemösszetétele.

Elem	Tömeg %	Atom %	Hiba %
Al	0.53	2.65	20.88
Si	0.36	1.73	21.9
Sn	65.61	73.98	3.23
Pb	33.49	21.63	13.09

A vastag ribbon esetén megállapítható, hogy az anyaga „60-40-es” forrasztóón, némi szilícium és alumínium adagolással. A vékony ribbon esetén megjelenik némi réz is. Ennek oka a felépítésében keresendő: a ribbon mindkét esetben egy forrasztóónnal bevont réz huzal, de a vékony ribbon esetén a bevonat vékonyabb, mint az elektronsugár gerjesztési térfogata, így ott megjelenik a réz is.

Az előző pontokban tárgyalt okok miatt korróziós teszteket is végrehajtottunk, amelynek során, ahogy a 20. ábra is mutatja, a ribbon erősen korrodálódott. A kémiai terhelés során az ólom kioldódik a ribbon bevonatából és ólom-kloridot képez. A folyamat hatására a forrasztási kötések elengednek és megszűnik a kapcsolat a wafer és a ribbon között.



20. ábra: Ribbon korróziós teszt SEM felvételek a teszt előtt (a) és után (b)

3.2 A laminált cellákon végzett mérések

Az alapanyagok tesztjeivel ellentétben itt a cellát, mint egységet tekintjük. A mérések leírását az előző fejezetben ismertetett módokon végezzük alább az eredmények bemutatásai következnek.

3.2.1 Kombinált klímakamrás vizsgálat

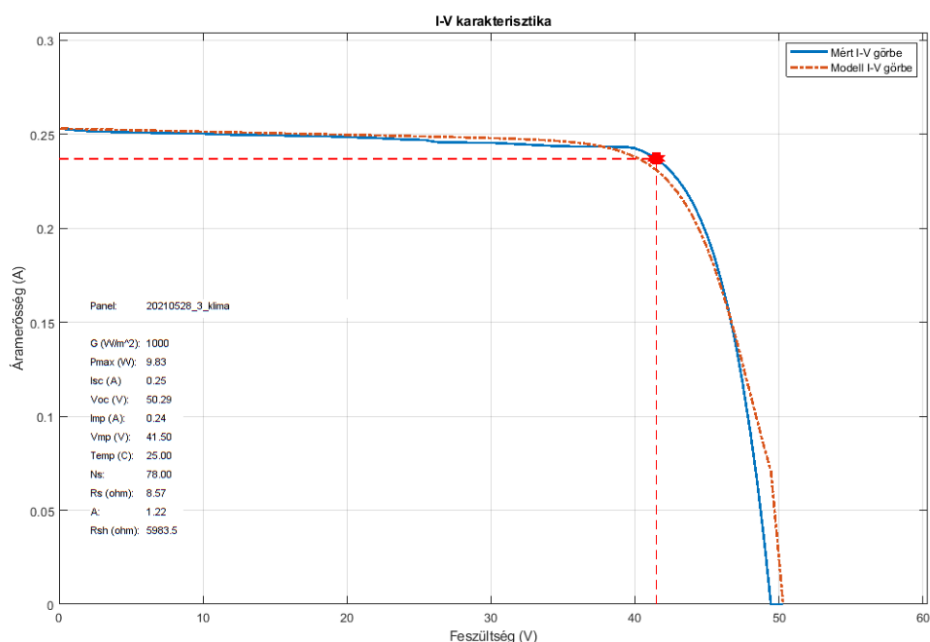
Az első módosított ciklus elvégzése után először szabad szemmel vetettük vizuális vizsgálat alá a cellákat egy ép napelemmel összehasonlítva. Szabad szemmel érzékelhető változás nem történt. A fénymikroszkópos felületvizsgálat szintén nem mutatott változást, az elektromos markerek alig csökkentek. A színmérés ugyanazt a színingert adta, mint korábban. Az eredmények a drasztikusan kitolt hőmérséklettartományban sem változtak (10. táblázat), amelyet a 21. ábra is szemléltet. Az IEC61215 szerint leírt hőmérséklet profilnak megfelelően végzett tesztek eredményeit a 11. táblázat foglalja össze.

10. táblázat: A klímakamrás vizsgálat eredményei (kitolt hőmérsékleten).

Klímakamra előtt					
Sorszám	I _{SC}	V _{OC}	I _{mp}	V _{mp}	FF(%)
20210528_3	0,25	47,29	0,23	41	79,76
20210528_4	0,25	45	0,23	38	77,69
20210528_5	0,25	46,5	0,23	40	79,14
Klímakamra után					
Sorszám	I _{SC}	V _{OC}	I _{mp}	V _{mp}	FF(%)
20210528_3	0,25	50,29	0,24	41,5	79,22
20210528_4	0,26	47,32	0,24	39	76,08
20210528_5	0,25	49,14	0,24	40,5	79,12

11. táblázat: A klímakamrás vizsgálat eredményei (IEC 61215).

Klímakamra előtt					
Sorszám	I _{SC}	V _{OC}	I _{mp}	V _{mp}	FF(%)
20210528_27	0,259	45,695	0,237	38,308	76,53
20210528_32	0,244	47,651	0,224	39,465	76,13
20220930_17	0,253	52,173	0,223	43,27	73,5
Klímakamra után					
Sorszám	I _{SC}	V _{OC}	I _{mp}	V _{mp}	FF(%)
20210528_27	0,247	52,34	0,222	42,529	68,87
20210528_32	0,258	48,98	0,208	39,974	73,49
20220930_17	0,25	47,521	0,235	38,29	72,12



21. ábra:20210528_03 klímakamra utáni I-V karakterisztikája.

Megállapítható, hogy a kitöltési tényező ~8%-ot és ~3%-ot csökkent a 720 másodperc laminálási idő során (20210528_27 és 20210528_32 számú próbatestek), ami jelentős degradációra utal. Abban az esetben, ahol a panelek tartózkodási ideje csupán 100-100 s volt, nem tapasztalható ilyen mértékű csökkenés.

3.3.2 Mechanikai ellenállóképesség 1. – Ütőszilárdság

A panel üveglapja körülbelül 40 cm-es ejtési magasság esetén törik be (2,2 kg-os acélgolyót alkalmazva), vagyis a maximális ejtési magasság 30 és 40 cm között alakul, ami 8,63 J alatti maximális ütőmunkát jelent. Egy sorozatban külön paneleken és egy sorozatban egy panelen végeztünk ejtést a törésig. A kitöltési tényezők változását a 16., 17. és 18. táblázat foglalja össze.

16. táblázat: A kitöltési tényező változása az ejtési magasság függvényében-külön paneleken.

Panel sorszáma	Ejtési magasság (cm)	Ejtés előtti kitöltési tényező (%)	Ejtés utáni kitöltési tényező (%)	Változás (%)
20210518_18	10	76,98	77,21	+0,30
20210528_16	20	77,04	76,49	-0,72
20210528_14	30	77,43	76,84	-0,77
20220930_10	10	73,91	71,30	-2,61
20220930_08	20	74,96	75,20	+0,24
20220930_07	30	73,45	55,42	-18,03

17. táblázat: A kitöltési tényező változása az ejtési magasság függvényében-720 másodperces panel.

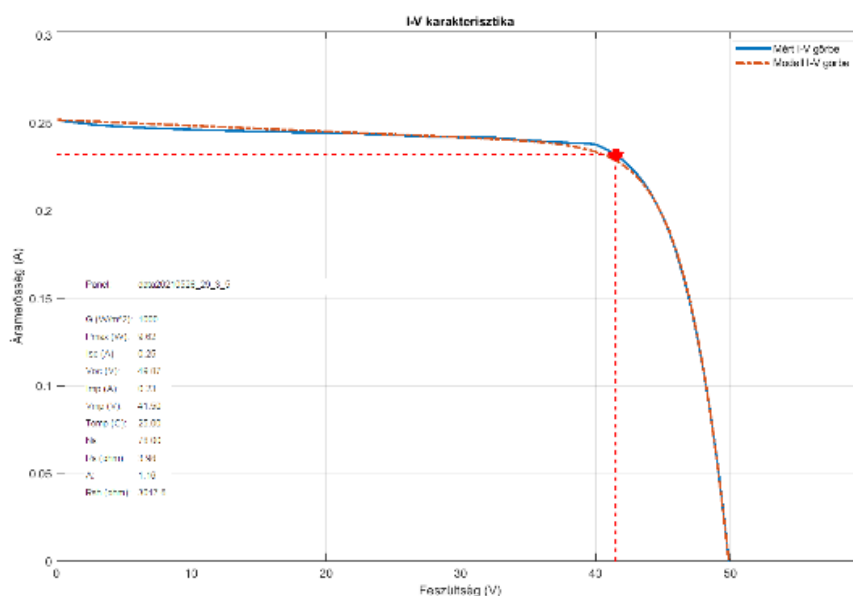
Panel sorszáma		A kitöltési tényező magasságonként				
20210528_29	Ejtési magasság (cm)	0	10	20	30	40
	Kitöltési tényező (%)	76,56	77,41	77,28	77,34	50,07
		Az ütőszilárdság magasságonként (J)				
	Ütőszilárdság (J)	0	2,16	4,32	6,47	8,63

18. táblázat: a kitöltési tényező változása az ejtési magasság függvényében-200 másodperces panelen.

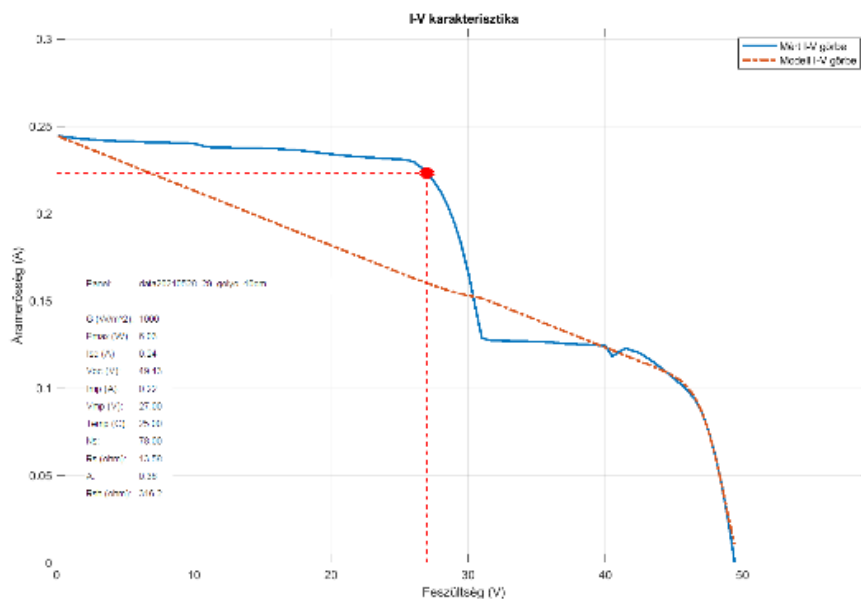
Panel sorszáma	A kitöltési tényező magasságonként								
20220930_06	Ejtési magasság (cm)	0	10	20	30	40	50	60	65
	Kitöltési tényező (%)	75,87	74,90	74,41	77,09	77,98	73,78	71,99	41,56
	Az ütőszilárdság magasságonként (J)								
	Ütőszilárdság (J)	0	2,16	4,32	6,47	8,63	10,79	12,95	14,03

20220930_06 különösen nagy ellenállóképességgel rendelkezett, még a 12,95 J ütőmunkát is kibírta, ami kimagasló értéknek számít.

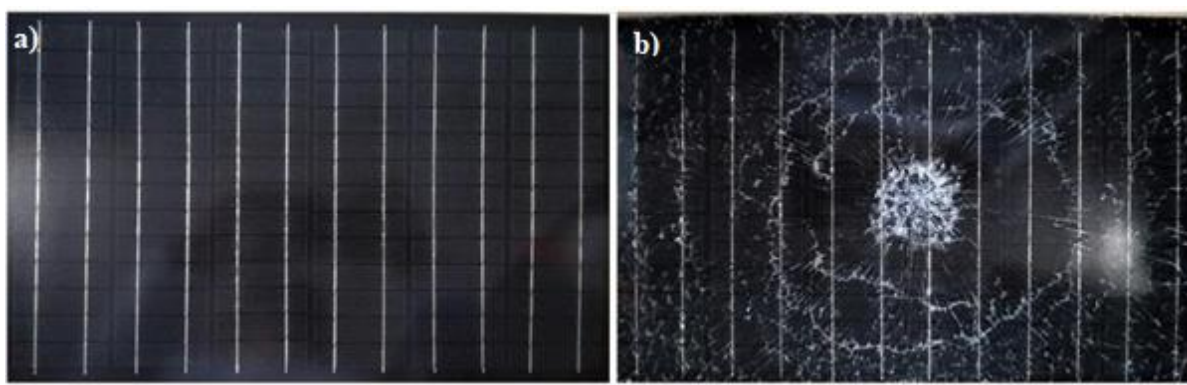
Az első törött panel I-V karakterisztikáját vizsgálva szembetűnik, hogy abban egy lépcsős letörés található. Ez arra utal, hogy belső, azaz diódahiba is keletkezett a panelben.



22. ábra: A 20210528_29-es panel eredeti I-V karakterisztikája.



23. ábra: a 20210528_29-es panel törés utáni I-V karakterisztikája-



24. ábra: A 20210528_29-es panel törés előtti (a), illetve utáni (b) állapota.

Ha összevetjük az I-V karakterisztikát a klímakamra utánival, akkor azt tapasztaljuk, hogy a golyóejtés után megjelennek letörések a lefutásban, ami diódahibára utal, Ahmad és munkatársai által leírt módon [29]. Azaz egy ilyen sérülés esetén nem csak az üveg megy tönkre, hanem az alatta lévő wafer is.

3.3.3 Mechanikai ellenállóképesség 2. - Pontszerű terheléssel szembeni ellenállóképesség

Az alkalmazott maximális terhelőerő mellett szabad szemmel megfigyelhető változás nem történt. A paneleken ötször és tízszer egymás utáni megnyomatás után sem alakult ki megfigyelhető változás. A mérési eredményeket a 19. és 20. táblázat foglalja össze.

19. táblázat: Lassú és gyors pontszerű terhelések hatása a napelemekre-720s cellák.

A panel sorszáma	Terhelési sebesség (kN/min)	Eredeti FF(%)	FF egy terhelés után (%)	FF öt egymás utáni terhelésnél (%)	FF tíz egymást követő terhelésnél (%)
20210528_8	0,5	77,07	77,85	78,11	78,11
20210528_9	432,0	77,97	77,88	76,99	77,88

20. táblázat: Lassú és gyors pontszerű terhelések hatása a napelemekre-200s cellák.

A panel sorszáma	Terhelési sebesség (kN/min)	Eredeti FF(%)	FF egy terhelés után (%)	FF öt egymás utáni terhelésnél (%)	FF tíz egymást követő terhelésnél (%)
20220930_25	0,5	81,02	80,02	81,22	80,88
20220930_32	432,0	78,96	79,23	79,00	79,23

Az adatokból megállapítható, hogy a napelemek ellenállóak az ilyen típusú terhelésekkel szemben, a kitöltési tényező nem változott jelentősen.

3.3.4 Mechanikai ellenállóképesség 3. - Statikus terheléssel szembeni ellenállóképesség

Már egyetlen, 100 kN-os terhelés után is körülbelül 5%-ot esett a fill-factor. Egy másik panelen elvégezve az 1-5-10 sorozatot, azt tapasztaltuk, hogy a csökkent érték egy idő után nem csökken tovább, még további terhelés után sem. A 20210528_21-es panelt 200 kN-nal terheltük, I-V karakterisztikája lépcsős, tehát a waferben mindenképp végbementek mikroszkópius változások. A mérés során kapott eredményeket a 21. és 22. táblázat foglalja össze, valamint a 25. és 26. ábra szemlélteti.

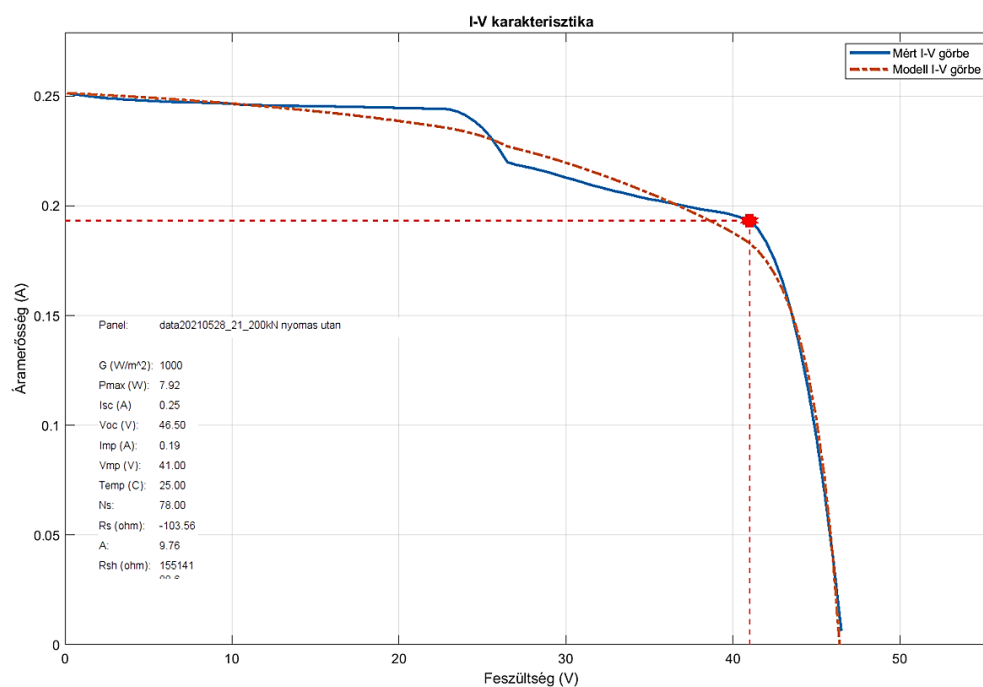
21. táblázat: Statikus nyomószilárdság tesztjének végeredményei-720s cella.

Panel sorszáma	Terhelés száma	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	A (W)	B (W)	FF (%)
20210528_12	0	0,26	48	0,24	40,5	12,48	9,72	77,88
	1	0,26	46,5	0,23	38,1	12,09	8,763	72,48
20210528_13	0	0,25	43,47	0,23	38,5	10,8675	8,855	81,48
	1	0,25	43,5	0,23	36,5	10,875	8,395	77,207
	5	0,26	44,5	0,22	38	11,57	8,36	72,26
	10	0,26	45	0,22	38,5	11,7	8,47	72,39

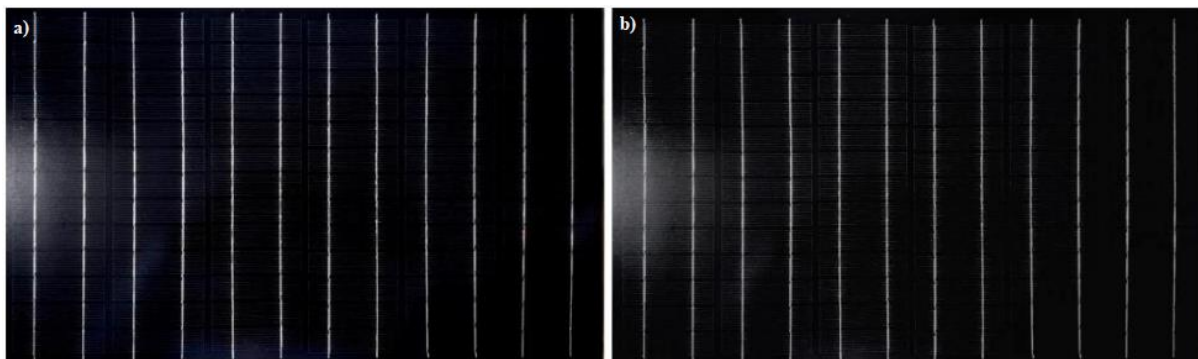
22. táblázat: Statikus nyomószilárdság tesztjének végeredményei-200s cella.

Panel sorszáma	Terhelés száma	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	A (W)	B (W)	FF (%)
20220930_11	0	0,24	51,80	0,22	43,00	12,432	9,46	76,09
	1	0,25	51,28	0,17	43,00	12,82	7,31	57,02
20220930_12	0	0,24	51,55	0,22	42,50	12,372	9,35	75,57
	1	0,25	51,26	0,23	41,50	12,815	9,545	74,48
	5	0,25	51,20	0,20	43,00	12,80	8,6	67,19
	10	0,25	51,29	0,21	43,00	12,823	9,03	70,42

A 200s panelekkel végzett mérések esetén 20220930_11-et 1-szer 200kN-nal, 20220930_12-t 100kN-nal 1-szer, 5-ször és 10-szer nyomattuk meg.



25. ábra: A 20210528_21-es panel 200kN statikus terhelés után.



26. ábra: A 20210528_21-es panel állapota 200kN statikus terhelés előtt (a) és után (b).

A tesztelés során szemmel látható változás nem történt, ennek ellenére megjelentek a letörések. Ez azt jelenti, hogy az üveg sérülése nem feltétele a diódák sérülésének.

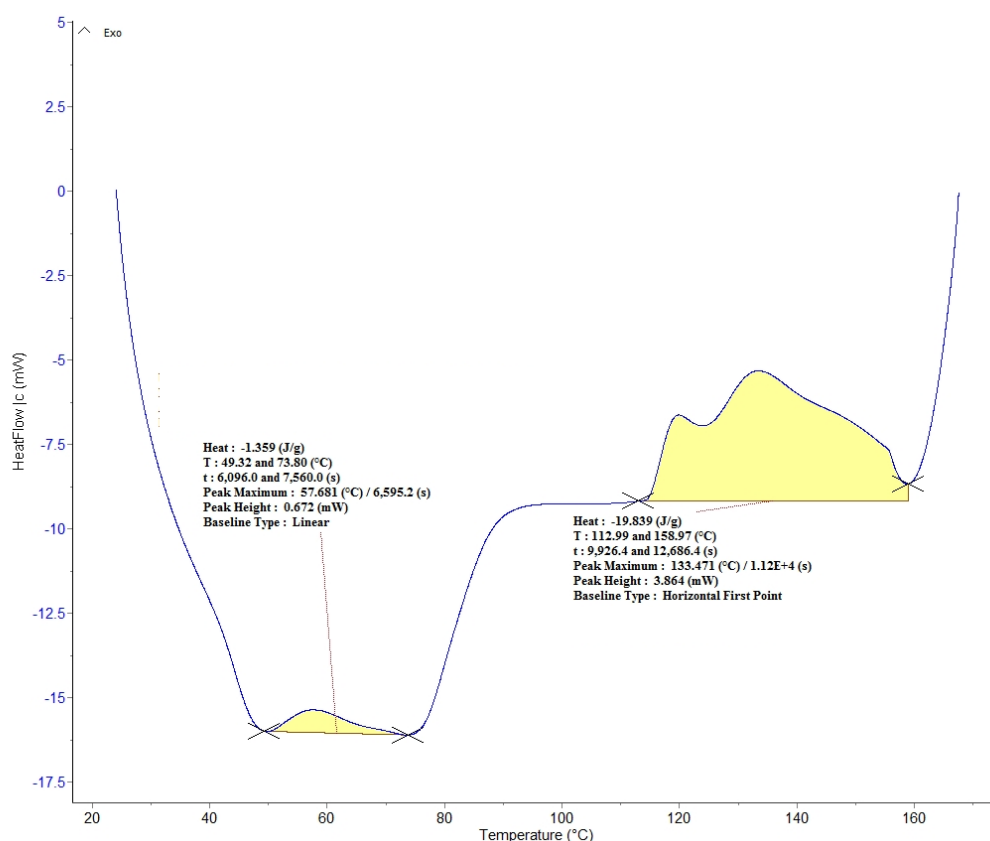
A 200 s-es panelek hasonló viselkedést mutatnak, mint a 720 s-esek: a 200 kN-os I-V görbéjében többszörös letörés található, diódahibás. A 100 kN-os eset szintén hasonló: bizonyos erőhatás közlése után a FF kb 5%-ot esik és ott stabilizálódik. A karakterisztika alapján kisebb diódahibák (repedések) előfordulhatnak.

Ezen terheléstípus elsősorban szállításkor fordulhat elő, az egymásra pakolásból adódóan. Amennyiben a megfelelő csomagolási szabályokat betartják, a sérülés, ezzel pedig a teljesítmény romlása elkerülhető.

4. A hőkezelés hatása a etilén-vinil-acetát fóliára

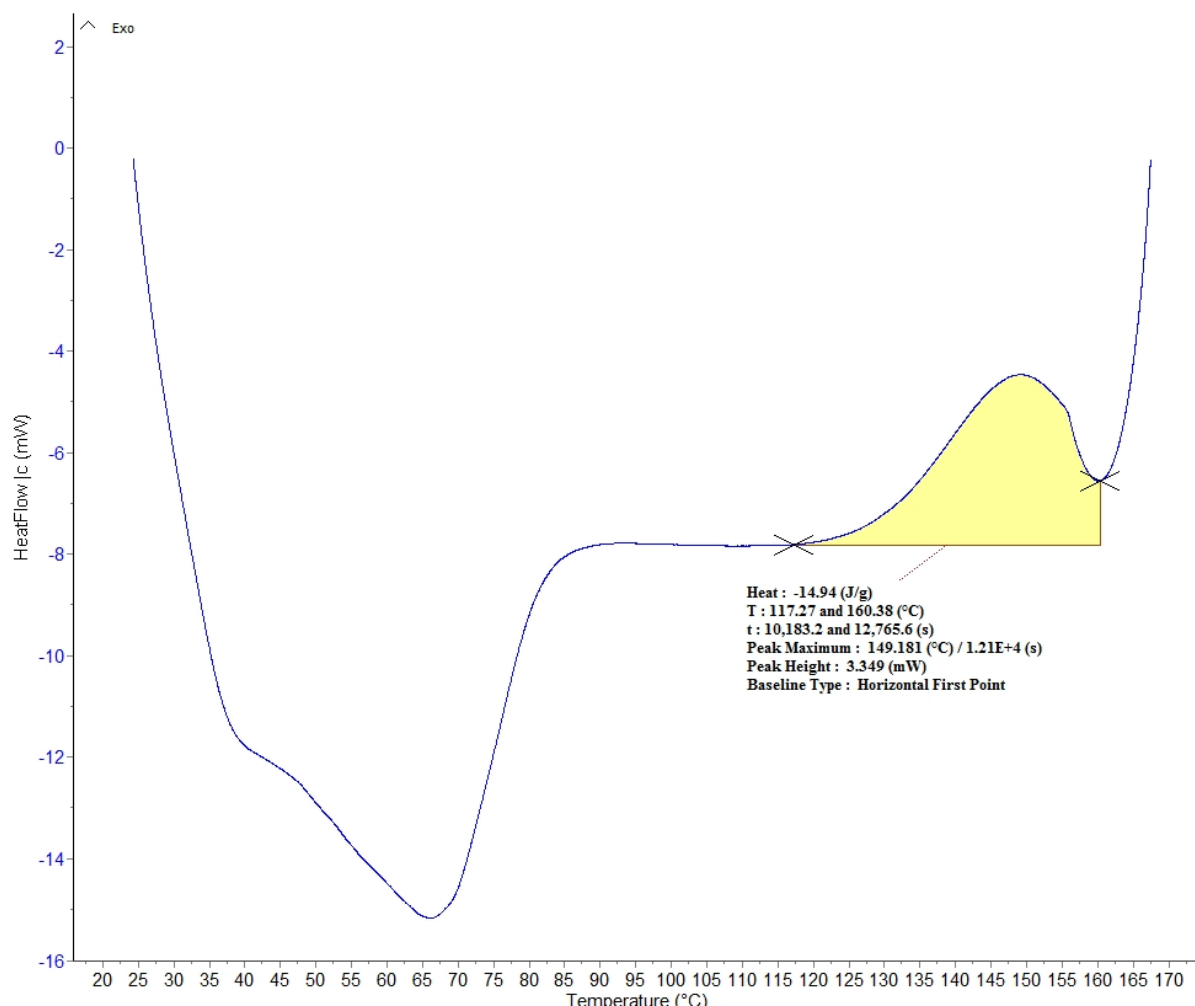
Ahogy a kombinált klímakamrás tesztek során kapott eredményekből is látható, a 720 másodperces kezelés hatására jelentősen (~8%) csökkent a panelek teljesítménye. Néhány panel a laminációs ciklus után néhány órával a végső sorjázástól függetlenül spontán delaminálódott a széleinél, valamint ott, ahol közvetlenül érintkezik a környezettel. Ez a cella szélein megjelenő elválást jelentette. A probléma kritikusnak minősül, hiszen ekkor a kötőerők hiánya miatt a cella mechanikailag instabil, balesetveszélyes és sérülékeny (korrozív anyagok direkt tudják a wafert támadni). A hibát első közelítésben az üveg-EVA kölcsönhatásra vezettük vissza, ezt kezdtük el vizsgálni. Felmerült ugyanis, hogy a problémát az üveglap izopropil-alkohollal való áttörése után maradó folyadéknymok okozzák, amelyek kioldják a fóliából a szilános iniciátort, ami a felületen lerakódva rontja a kötőerők kialakulását az üveg felé, valamint a Bosch-paletták kenését biztosító szilikonolaj lerakódása is felmerült, mint esélyes hibaforrás. Elektronmikroszkóp alatt vizsgáltunk üvegfelületeket úgy, hogy azokra IPA-t

cseppentettünk és EVA-t fektettünk. A kontrollminták mellett a kezelt minták egyáltalán nem mutattak különbséget, egyedül egy helyen találtunk szilánra utaló nyomokat az öt mintából, ott is csak olyan mennyiségben, hogy a mérési hiba lehetősége fennáll. A szilán lerakódása tehát nem a hiba oka volt. Ezután az EVA fóliát kezdtük vizsgálni. Bár alig, de a fólia összetétele változott, ez nemcsak a szilánalapú iniciátort, hanem az etilén és a vinil-acetát keverési arányát is jelentette, ami adott körülmények között a polimerizáció fok megváltoztatására képes. A végtermékben található EVA fólia polimerizációjának kimérése elsősorban a gyártási paraméterek optimalizálása miatt fontos, főleg a laminátor paramétereinek meghatározásánál. Itt történik meg ugyanis a végpolimerizáció, amelynek optimálisnak kell lennie, hiszen amennyiben a hőmérséklet, vagy a tartózkodási idő túl kicsi, a polimerizáció nem teljes és az adhéziós erők nem lesznek elég erősek, ellenkező esetben a fólia rideggé válik, ragasztó hatása romlik. A tesztekhez tefloncsíkok közé tettünk EVA-t és lamináltuk, először a 720 s tartó recepten, majd egy módosított, rövidített, 200 s tartó recepttel. A kész fóliából vettünk egy darabot és DSC analízisnek vetettük alá, amelyet a 26. és 27. ábra szemléltet.



27. ábra: a 200 s-en kezelt EVA DSC görbéje

A görbe az endoterm olvadás miatt lefelé indul meg. A görbe alján egy kis exoterm csúcs jelent meg, ami olvadás volt, majd később megjelent a fő kristályosodási exoterm csúcs, ami a polimerizáció lejátszódását jelezte. A polimerizáció során leadott hő ebben az esetben 19,83 J/g volt.



28. ábra: A 720 s-ig tartó hőkezelés utáni EVA DSC görbéje.

A lefutás teljesen azonos, de a hő itt csak 14,94 J/g volt. A kisebb energia azt jelenti, hogy több anyag polimerizálódott, mint a 200 s-es esetben, de ekkor túllépjük az ideális polimerizációfokot. Ezt a Soxhlet-extrakció során kapott eredmények is alátámasztják (23. táblázat).

23. táblázat: A különböző hőmérsékleten kezelt EVA fóliák térhálósodásának vizsgálata.

	Extrakció előtt mért tömeg (g)	Extrakció után mért tömeg (g)	Polimerizáció fok
ideális	-	-	~85%
200s	2,2446	1,8636	83,026%
720s	2,2703	2,0230	89,11%

A kapott adatokból arra tudtunk következtetni, hogy az EVA a 720 másodperces kezelési idő alatt túlsült. Ezt a DSC adatai, az extrakció adatai, illetve a leválasztott minta is igazolta: a jól nyújthatóság helyett egy kifejezetten rideg anyagot kaptunk, amely a lehűlés során nem tudta követni az üveg dilatációját és levált arról. Amennyiben csökkentjük a lamintárban a hőkezelés idejét, olyan terméket kapunk, amely tudja követni a hőingadozással járó dilatációt és elkerülhető a delamináció jelensége. A rövidebb kezelési idővel növelhető az adott idő alatt gyártott termékek mennyisége és csökkenthető az egységnyi termékre fordított energia is.

5. Összegzés

A napelem mint zöld energiaforrás kitűnő választás lenne az áramtermelés szempontjából. A gyártás során azonban számos hiba felléphet. Ha az a célunk, hogy a panelek kibírják a névleges 25 év időtartamot, fontos, hogy jó minőségű panelek kerüljenek ki a fogyasztókhoz. Az eddigi vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy ezek a tényezők és szempontok megvalósulni látszanak: jó minőségű alapanyagokból egy strapabíró, robosztus termék készült el, mely jól fogja bírni a környezeti behatásokat.

A vizsgálatok célja csak néhány esetben volt a panelek teljes elroncsolása, általában azonban a környezeti behatások modellezésén keresztül valamilyen mérhető változást, választ vártunk a panelektől, amely az élettartamra és a behatások cellára való effektusaira enged következtetni valós használat esetén. Ezek az I-V görbe, a maximális teljesítmény, de elsősorban a kitöltési tényező értékei voltak, ez utóbbi nyomonkövetése a vizsgálatok során kiváló indikátornak bizonyult. A mechanikai tesztek (pontoszerű terhelés, nagy felületű terhelés, ütőmunkával szembeni ellenállóképesség tesztje) során nemcsak a mérési sorozat elején és végén, hanem közben is kerültek felvételre mérési pontok, így a változásokat folyamatszemléletű módon tudtuk végezni. A mérések megerősítik, hogy a laminációs technológia egy működőképes és (mechanikai szempontból) jó ellenállóképességgel rendelkező napelemek gyártására alkalmas. Reméljük a további vizsgálatok is megerősítik ezeket a kívánalmakat. Megállapítható továbbá, hogy az elvégzett mérések a végtermék tesztelésére alkalmas, azokon keresztül jól minősíthető.

6. Források

- [1]: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TotElecCons>
(2022. november 1-i hozzáférés)
- [2]: Environmental cumulative effects of coal underground mining. Meng Lei, Feng Qi-yan, Zhou Lai, Lu Ping, Meng Qing-jun. School of Environmental Science & Spatial Informatics, China University of Mining and Technology Jiangsu és Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining and Technology, Eiselever, Procedia Earth and Planetary Science, Volume 1, Issue 1, 2009 - doi:10.1016/j.pro.2009.09.198
- [3]: Mark Squillace, The Strip Mining Handbook, Environmental Policy Institute, 1990, második fejezet
- [4]: <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/coal-and-the-environment.php>
(2022. november 1-i hozzáférés)
- [5] <https://www.worldometers.info/coal/> (2022. november 1-i hozzáférés)
- [6] David JC MacKay: Sustainable Energy — without the hot air. UIT Cambridge, England. UIT Cambridge Ltd. 2008. 38 o.
- [7] Török Imre. Napelemes rendszerek energiahozama és működési hatékonysága, Doktori (Ph.D.) értekezés. Debreceni Egyetem, Kerpeley Kálmán Doktori Iskola. Debrecen. 2017
- [8] Kovács Kristóf. Napelem anyagrendszerek hatásfokának javítása I. Pannon Egyetem. Veszprém. 2007.
- [9] Rácz Ervin. A napelemek fizikai alapjai. Óbudai Egyetem, Villamosenergetikai Intézet. Budapest, 2015
- [10] Mars Solar Power. Geoffrey A. Landis, Thomas W. Kerslake. Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, valamint Phillip P. Jenkins, David A. Scheiman. Ohio Aerospace Institute, Brook Park, Ohio. 2004. NASA/TM—2004-213367 AIAA—2004—5555
- [11] <https://www.ossila.com/pages/solar-cells-theory> (2022. november 1-i hozzáférés)

- [12] Miniaturization Problems in CMOS Technology: Investigation of Doping Profiles and Reliability. Robert Wittmann. Technischen Universität Wien, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Wien. 2007. 2-ik fejezet
- [13] Armin Räuber. Napelem technológiák és jellemzőik. SOLTRAIN – G04 előadás, 2016
- [14] Napelemek gyártástechnológiája a Yingli Green Energy Társaságnál. Husi Géza, Bartha István, Tóth János. Debreceni Egyetem, Műszaki Kar. Debreceni Műszaki Közlemények, 2009/1-2
- [15] - Solar cells, Materials, Manufacture and Operation. Augustin McEvoy, Tom Markvart, Luis Castaner. Second edition, Elsevier, 2013, 79. oldal
- [16] Czochralski Silicon Single Crystals for Semiconductor and Solar Cell Applications Kakimoto, K. .In.: Springer Handbook of Crystal Growth. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2010. 231–243. oldal doi:10.1007/978-3-540-74761-1_8
- [17] Fabrication and analysis of high-efficiency String Ribbon Si solar cells. Kent Nakayashiki, Brian Rousaville, Vijay Yelundur, Dong Seop Kim, Ajeet Rohatgi, Robert Clark-Phelps, Jack I. Hanoka. Solid-State Electronics, 2006 <https://doi.org/10.1016/j.sse.2006.06.011>
- [18] <https://www.nytimes.com/2011/01/15/business/energy-environment/15solar.html?pagewanted=all> (2021. május 12-i hozzáférés)
- [19] Bereczky György. CorecommSi-Pannon Egyetem, Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ, elektronikus tananyag
- [20] Napelemek mérése- Mérési útmutató, Megújuló energiatermelést bemutató energiapark. összeállította: Balogh József, Kulcsár Attila, Pasinszki István. BMF KKVVEI, Budapest, 2006. november
- [21] [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Chemistry_of_the_Main_Group_Elements_\(Barron\)/07%3A_Group_14/7.10%3A_Semiconductor_Grade_Silicon](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Chemistry_of_the_Main_Group_Elements_(Barron)/07%3A_Group_14/7.10%3A_Semiconductor_Grade_Silicon) (2022. november 1-i hozzáférés)
- [22] Scanning Electron Microscopy. An Introduction to Microscopy by Means of Light, Electrons, X-Rays, or Ultrasound Rochow, T. G., & Rochow, E. G. Springer, Boston, MA, 1978, 273–298. oldal doi:10.1007/978-1-4684-2454-6_13
- [23] Dr. Tamás Ferenc (1982): Szilikát ipari kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest

- [24] Kristóf, J.: Kémiai analízis II, Veszprémi Egyetemi Kiadó, 2000, 70-90 oldal
- [25] <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>
(2022. november 1-i hozzáférés)
- [26] Degradation analysis of crystalline silicon photovoltaic modules exposed over 30 years in hot-humid climate in China. Huili Han, Xian Dong, Bingzhi Lib, Huan Yan, Pierre J. Verlinden, Jiangfeng Liu, Jiapei Huang, Zongcun Liang, Hui Shen. 2018, Solar Energy, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.027>
- [27] Ludwig B. Klindt, Dr. Wolfgang Klein: Az üveg mint építőanyag, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981
- [28] Lukács Gyula. Színmérés, Műszaki Kiadó, Budapest, 1982
- [29] Detection of Typical Defects in Silicon Photovoltaic Modules and Application for Plants with Distributed MPPT Configuration. Ahmad, J., Ciocia, A., Fichera, S., Murtaza, AF, Spertino, F. Energies, 2019. doi:10.3390/en12234547
- [30] Crystalline Silicon PV Module Field Failures. Shuying Yang, Long Jiang. In: Durability and Reliability of Polymers and Other Materials in Photovoltaic Modules, szerk: William Andrew. Elsevier 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01032-X>
- [31] E. Wesoff, IEA: Global Installed PV Capacity Leaps to 303 Gigawatts, 2017. Available at: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/iea-global-installed-pv-capacity-leaps-to-303-gw#gs.E7rAO0g>.
- [32] Thermo-mechanical stability of lightweight glass-free photovoltaic modules based on a composite substrate. Ana C. Martins, Valentin Chapuis, Alessandro Virtuani, Heng-Yu Lib, Laure-Emmanuelle Perret-Aebi, Christophe Ballif. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.015>
- [33] A new approach for parameter estimation of the single-diode model for photovoltaic cells/modules. Bilge Kaan ATAY, Ulaş EMİNOĞLU. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2019
- [34] Photovoltaic module stability and reliability. D. Jordan, S. Kurtz. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, United States, 2016

- [35] Szerk.: Pokol György. ANALITIKAI KÉMIA-Egyetemi tananyag. BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszék, 2011, 166. oldal
- [36] Karoui R. (2012). Food Authenticity and Fraud. In.: Chemical Analysis of Food: Techniques and Applications, Elsevier, 2020, 579–608. oldal <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813266-1.00013-9>
- [37] Bot György Általános és szervetlen kémia. Medicina könyvkiadó Bp. 1983