

Környezetbarát energiatermelés, energiahatékonyság és közlekedés szempontjából kritikus üvegek, kerámiák és fémek

Hegedüs Nikolett¹, Furkó Mónika², Balázs Katalin³ és Balázs Csaba^{3,a}

1 *Óbudai Egyetem, Anyagtudományi Doktori Iskola, 1034 Budapest, Bécsi út 96/B*

2 *ELKH - Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, 1121 Budapest, Konkoly-Thege út 29-33.*

email: ^abalazsi.csaba@ek-cer.hu

Absztrakt

Környezetkímélő technológiák bevezetése kiemelt fontosságú nemcsak a fejlett, hanem a fejlődő országokban is a klímaváltozás hatásának csökkentése érdekében. A nyersanyag- és energiafelhasználás valamint ezzel összefüggésben a káros anyag kibocsátás nagyobb ütemű növekedése várható a közeljövőben. A jelenlegi zöld technológiák még nem tökéletesek, azonban egyre hatékonyabbá válnak célorientált kutatási-fejlesztési projektek által és kevesebb káros, toxikus és kritikus anyag felhasználással járnak. A különféle anyagok kritikus jellegét az energiaiparon kívül az egészségügyben, hadiiparban valamint az elektronikai iparban is vizsgálni szükséges.

Kulcsszavak: zöld technológiák, kritikus anyagok, üvegek, kerámiák, fémek

Abstract

The introduction of environmentally friendly technologies is a priority not only in developed countries but also in developing countries in order to reduce the impact of climate change. The use of raw materials and energy and, in this context, emissions are expected to increase at a higher rate in the near future. Current green technologies are not yet perfect, but they are becoming more efficient through goal-oriented research and development projects and involve fewer harmful, toxic and critical substances. In addition to the energy industry, the critical nature of the various materials needs to be examined in the health, defence and electronics industries.

Keywords: green technologies, critical materials, glasses, ceramics, metals

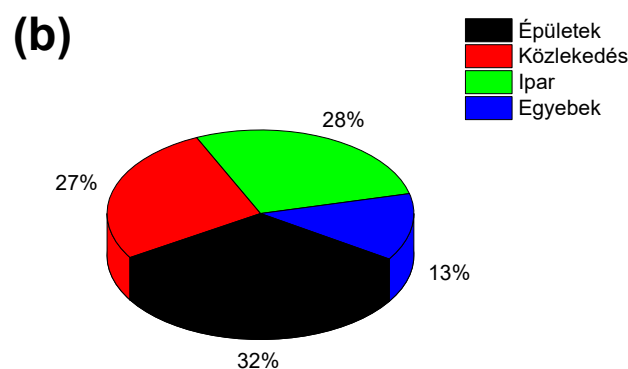
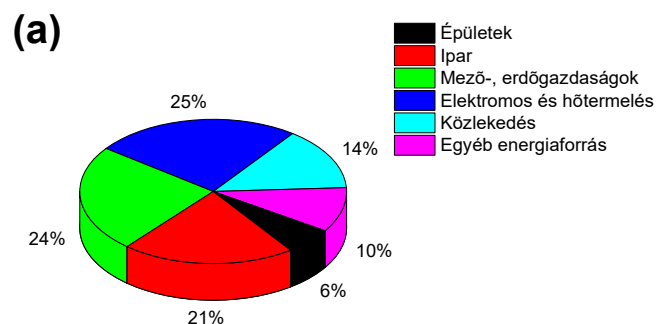
Bevezetés

A gazdaság folyamatos fejlődésének következményeként annak környezetre gyakorolt hatása is kiemelt figyelmet igényel. Az energiatermeléshez és gyártáshoz felhasznált nyersanyagok mennyisége exponenciálisan növekedett világszerte, ez a növekedési ütem azonban hosszú távon nem fenntartható. A „zöld” környezetbarát energiatermeléshez, alacsony szennyezőanyag kibocsátású közlekedéshez és a világítástechnikához használt anyagok fontosságának és hatásainak megértése elengedhetetlen a mérnökök számára, hogy új megoldásokat keressenek fenntartható technológiák, megoldások kidolgozásában.

A klímaváltozás következtében az extrém időjárási jelenségek, hurrikánok, megjósolhatatlan árvizek, erdőtüzek gyakorisága jelentősen megnövekedett az elmúlt évtizedekben. Az üvegházhatású gázok antropogén eredetű kibocsátásának növekedése szintén hozzájárul a klímaváltozáshoz. A fő kibocsátó szektorok az 1. ábrán láthatók.

Megfigyelhető, hogy az ásványi anyagok, fémek kitermelését, valamint az üvegek és kerámiák előállítását biztosító nagy iparágak felismerték ezt a problémát és lehetőséget láttak ebben a kihívásban, hogy szakterületükön forradalmi változásokat, fejlesztéseket dolgozzanak ki és vezessenek be. Az elektromos áramtermeléssel, hőtermeléssel, építkezéssel, közlekedéssel foglalkozó iparágak, amelyek a teljes üvegházhatású gázkibocsátás mintegy 76%-áért

felelősek, egyre inkább környezetbarát technológiákat alkalmaznak [1,2].



1. **ábra:** Üvegházhatású gázkibocsátás iparágakra bontva világszerte (a) teljes kibocsátás 49 Gt CO₂eq 2010-ben és a végfelhasználó iparág szektorok energiaszükséglete világszerte (b) a teljes energiaszükséglet 2010-ben 366 EJ volt [1,2].

Azonban ezek a technológiák szintén jelentős nyersanyag felhasználást igényelnek, így ezen anyagok felhasználásának optimalizálása és megfelelő utánpótlás biztosítása kulcsfontosságú a fenntarthatóság biztosításához.

Cél egy zöldebb és biztonságosabb világ létrehozása.

Környezetkímélő, környezetbarát technológiák bevezetésével több kiemelt fontosságú program foglalkozik nemcsak a fejlett, hanem a fejlődő országokban is a klímaváltozás hatásának csökkentése érdekében. A fejlődő országokban a nyersanyag- és energiafelhasználás valamint ezzel összefüggésben a káros anyag kibocsátás nagyobb ütemű növekedése várható a közeljövőben, az emberek életszínvonalának növekedésével. A washingtoni World Resources Institute jelentése szerint [3] a fejlett országokban az egy főre eső átlagos üvegházhatású gázkibocsátás mintegy négyszerese a fejlődő országokban mérteknek. Kiemelkedő fontosságú, hogy a fejlődő országok lehetőséget kapjanak az előrehaladásra, és környezetbarát technológiák bevezetésére az iparosítás során, ezáltal elkerülve a fejlett országokban kialakított, káros fosszilis tüzelőanyag felhasználására alapuló iparágakat. A 2030-ig tervezett, 17 fenntartható fejlődés célkitűzése [4] közül a legfontosabbak az elérhető, megfizethető zöld energia, megfelelő, elegendő munkahely teremtése, folyamatos gazdasági fejlődés és a társadalmi egyenlőtlenségek csökkentése. Számos technológiát kidolgoztak és megvalósítottak a fenti célkitűzések realizálása érdekében, a környezeti károk csökkentését is figyelembe véve. Ezeket a technológiákat nevezzük zöld technológiáknak, mivel annak ellenére, hogy a környezeti lábnyomuk még mindig nem

elhanyagolható, még mindig sokkal kevésbé károsak a környezetre, mint a régebbi, elavult szénhidrogén-alapú technológiák. Ezek a fejlesztések segítenek egy zöldebb, élhetőbb, biztonságosabb világ megteremtésében, kevesebb káros anyag kibocsátással és szennyeződéssel. A jelenlegi zöld technológiák még nem tökéletesek, azonban egyre hatékonyabbá válnak a folyamatos kutatási-fejlesztési projektek által és kevesebb káros, toxikus és kritikus anyag felhasználással járnak. Az életciklus-analízis széleskörűen alkalmazott módszer egy termék/technológia környezetre gyakorolt teljes körű hatásának tanulmányozására a felhasználási ideje alatt. Az analízis segítségével összehasonlíthatjuk a termékeket különféle szempontok figyelembe vételével vagy olyan kritikus pontokat találhatunk a termékek/technológiák életciklusában, melyek a legkárosabbak a környezetre nézve. Például megtudhatjuk, hogy a kritikus anyagok bányászata, kinyerése és a zöld energia előállításának technológiája előnyösebb-e összességében nézve a hagyományos technológiáknál. A tudományos közösség számos életciklus analízist végzett ennek meghatározására. Egy példát kiemelve, megemlíjtük Stamp és munkatársai tanulmányát [5] akik azt vizsgálták, hogy a Li-ion akkumulátorok jelenlegi előállítási technológiája előnyösebbé teszi-e az elektromos járművek használatát a belső égésű motorral működőkhöz képest. Kimutatták, hogy a Li-elem gyártás abban az esetben lenne hátrányos, ha a gyártási

folyamatban tengervízet használnának a lítium-karbonát kinyeréshez. Azonban a jelenleg alkalmazott érc alapú technológiával az elektromos autók előnyei túlszárnyalják a Li-akkumulátor előállítás hátrányait.

Kritikus anyagok a zöld energiahatékony technológiákban

A tudományos irodalomban többféle elemet neveznek meg kritikus anyagként a zöld technológiákkal összefüggésben. A fő szempontok, kategóriák, amiket figyelembe kell venni a környezetbarát energiatermelés szempontjából: napelemek, szélturbinák, gázturbinák; az alacsony szennyezőanyag kibocsátású közlekedésben a tüzelőanyag cellák, akkumulátorok, motorok valamint az energiatakarékos világítástechnikában a fénykibocsátású diódák, LED-ek. Ezen technológiák alapanyag-szükséglete különbözik, mindegyik más anyagon alapszik. Némelyik alapanyag könnyen hozzáférhető és elérhető, míg mások beszerezhetősége lehet gátolt vagy akadályozott akár politikai, földrajzi vagy gazdasági okokból. A különféle gazdasági szervezetek másképpen definiálhatják a kritikus anyag fogalmát. Általánosságban az anyagok kritikussága a hozzáférhetőségének a kockázatában rejlik, úgymint beszerzési nehézségek, árának instabilitása, magas befektetési, előállítási költségek. Az USA Energiaügyi Hivatala (DOE) két fő kritériumot határozott meg az anyag kritikusságának

mérésére: beszerzési kockázat; szerepe, fontossága a zöld technológiákban [6]. A beszerzési kockázat eredhet az adott anyag kitermelt mennyiségéből, ha politikailag instabil országból kell importálni, környezeti, geográfiai hatásokból, környezetvédelmi szabályozásokból, alacsony újrahasznosíthatóságból valamint a nehéz helyettesíthetőségéből. A különféle anyagok kritikus jellege az energiaiparon kívül az egészségügyben, hadiiparban valamint az elektronikai iparban is ugyanolyan fontosságú.

A DOE elemzése szerint a diszprózium, terbium, európium, neodímium és ittrium rövid és középtávon kritikus elemek, a cérium, indium, lantán és tellúr majdnem kritikus elemek rövidtávon, míg a lítium elem enyhén kritikusként számít középtávon [6]. Több tanulmány alkalmaz különféle skálát az anyagok kritikusságának meghatározására. Az egyik ilyen például a Graedel és Nuss [7] által kiadott tanulmány, melyben 62 elemet osztályoznak ebből a szempontból. Erdmann és Graedel [8] összefoglaló munkájukban összesítették a témában publikált kutatási eredményeket. Az egyik legismertebb és elfogadott mérőskála a kritikusság meghatározására a Herfindahl-Hirschman index, amely az adott elem elérhető nyersanyagkészletének nagyságát, az anyag költségét, a piacon való jelenlétét veszi figyelembe. Olivetti és mtsai [9] vizsgálták a lítium, kobalt, mangán, nikkelt és szén elemek kritikusságát a Li-ion elem kémiában. Az elemeket a következő szempontok alapján elemezték: elsődleges kitermelés/bányászat;

utánpótlás; a legtöbbet kitermelő országok százalékos hozzájárulása az össztermeléshez; ezen országok geopolitikai helyzete, gazdasági stabilitása; az adott anyag fő termék vagy melléktermék a kitermelés során; a kitermelés mennyisége tudja-e követni a megnövekedett keresletet; valamint az anyag újrahasznosíthatóságának lehetőségét. Ez a tanulmány összességében kimutatta, hogy a Co a legkritikusabb elem a Li-ion akkumulátorok gyártásában rövidtávon, azonban maga a lítium elem is szóba jöhet, mivel az elkövetkező években várhatóan jelentősen megnövekedik a kereslet iránta az akkumulátoripar fellendülésével és elterjedésével a közlekedésben is (elektromobilitás).

Az akkumulátoripar egyik legújabb és legdinamikusabban fejlődő területe a nagyméretű innovatív akkumulátorok gyártása. A világpiacon mintegy 61,5 milliárd dollárban kerültek forgalomba csak 2018-ban és a piaci összetett éves növekedési ráta 11,4%-ra becsülhető 2020 és 2024 között. Ezeknek az akkumulátoroknak három fő jellemzője: (1) újratölthető energiaforrások, (2) nagyméretűek és nagy az energiatároló kapacitásuk, (3) technológiai szempontból fejlettek, korszerűek. A Li-ion elemek az elektronikai piac mintegy felét adták ki és előreláthatóan tovább növekszik a piaci részesedésük több mint 60%-ra 2023-ra. Egyéb ígéretes akkumulátoroknak számítanak még a NaS és a vanádium redox folyadékkáros akkumulátorok. Azonban a régi típusú akkumulátorok, úgymint az ólomakkumulátorok,

NiCd, és nikkelfémhibrid akkumulátorok egyre inkább visszaszorulnak a piacról [10]. Az 1. táblázatban láthatók a különböző típusú nagyméretű innovatív akkumulátorok.

1. generáció	2. generáció	3. generáció	4. generáció
akkumulátor			
ólom	Nikkel-fémhibrid	Ezüst cink	NaS
NiCd	Li-ion	Ezüst-kadmium	Nagyhőmérsékletű Li-ion
	Li-polimer	NiH	Redox folyadékkáros ramlásos
		Fém-levegő	NiFe
		NiZn	Ca-MS
			Na-MCl
			LiS

1. táblázat: Többgenerációs nagyméretű innovatív akkumulátorok.

A különböző, kritikusnak számító nyersanyagokat a nagyipari felhasználásban különböző iparágak szerint csoportosíthatjuk. A 2. táblázatban összefoglaljuk a jelentősebb kritikus elemeket három fő iparágban: zöld energiatermelés; alacsony kibocsátású közlekedés; energiahatékony technológiák. A zöld energiatermelésen belül megkülönböztetünk napelem-, szélturbina- és természetes gázturbina technológiákat.

		Típusok	Üvegek, kerámiák	Fémek
Zöld energiatermelés	Napelemek	CdTe	SnO ₂ , Zn ₂ SnO ₄ , ZnO, SnO ₂ , Cd ₂ SnO ₄	Cd, Te, Ni, Cr, Mo
		Kristályos Si	c-Si	Ag, Sn, Ni
		CIGS (réz-indium-gallium szelenid)	ZnO, NaO, CaO, SiO ₂	In, Ga, Se, Sn, Ni, Cr, Mo
	Szélturbinák	Állandó mágnes	Sr ₆ Fe ₂ O ₃ , Ba ₆ Fe ₂ O ₃ , Si ₃ N ₄	Dy, Nd, Mo, Tb, Pr
	Természetes gázturbinák	Szuperötvözet bevonatok	Y ₂ O ₃ -ZrO ₂ , CMC, Si ₃ N ₄ , Al ₂ O ₃ , SiC	Co, Ni, Re, Hf, Mo, Y
Alacsony kibocsátású közlekedés	Tüzelőanyag cellák	SOFC		Y, La, Ce, Co, Sm, Gd, Sr, Ni
		PEM		Pt
	Elemek/akkumulátorok	Li-ion	LiCoO ₂ , LiMn ₂ O ₄ , LiFePO ₄ , LiMn _{1,5} Ni _{0,5} O ₄ , LiNiMnCoO ₂ , LiNiCoAlO ₂ , Li ₄ Ti ₅ O ₂	Li, Co, Ni, Mn, Dy, Pr, Nd, V, Tb
		NiMH		Pr, Nd, La, Co, Mn, Ni, Ce, V, Tb, Dy
Motorok	Állandó mágnes	Sr ₆ Fe ₂ O ₃ , Ba ₆ Fe ₂ O ₃ , Si ₃ N ₄	Dy, Pr, Nd, Co, Tb	
Energihatékonyság	Világítás-technika	CFL		La, Ce, Tb, Eu, Y, Gd, Mn, Ge, In
		LFL		La, Ce, Tb, Eu, Y, Mn, Ga, Ge, In
		LED	Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce ³⁺ , YAG, LuAg, GAL, LaPO ₄ :Ce, Tb, BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu, Y ₂ O ₃ :Eu, (Y,Eu) ₂ O ₃ , InGaN	In, Ga, Ce, Eu, Y, Gd, La, Ni, Tb, Ge, Ag, Sn

2. Táblázat: Fémek, ötvözetek, kerámiák és üvegek a környezetkímélő energiatermelésben, alacsony szennyezőanyag kibocsátású közlekedésben valamint az energiahatékony technológiákban [1,6, 11-23,28,33].

A napelem technológia 1954 óta folyamatosan fejlődik és manapság is az egyik vezető iparág az újrahasznosítható energiatermelés területén. 2016-ban a világ napenergia termelésének mintegy 6%-át biztosították a vékonyréteg alapú napelemek, melyeknek 3,8%-a CdTe és 1,6%-a réz-indium-gallium szelenid (CIGS) alapú volt. A maradék 96%-ot mono-szilícium (24,5%) és

multi-szilícium (69,5%) vegyületek alkották [21]. A CdTe alapú napelemekben az abszorber, vagyis az aktív réteg a kadmium és a tellúr, melyek mennyiségi aránya 48:52 [22]. Általában az abszorber réteg vastagsága 1 és 3 µm közötti, azonban néhány esetben elérheti a 10 µm-t is [23]. A CIGS alapú napelemekben indium és gallium az aktív elem az abszorber rétegben és a

vastagságuk 1 és 2,5 μm között változik [24]. Manapság kutatások folynak az indiumtartalom csökkentésére a galliumtartalom növelésével, ami által növekedne az úgynevezett tiltott sáv „bandgap” és nagyobb hatékonyságot eredményezne [25]. A kristályos szilícium alapú napelem paneleknél ezüstöt használnak szitanyomó pasztaként az alacsony elektromos ellenállása miatt [26], az átlátszó, vezető oxid rétegben pedig ólom és indium elemeket [21]. A szélturbinák esetében a legfontosabb technológiai alkotóelemek az állandó mágnesek, melyeket a közvetlen meghajtású (direct-drive) szélturbináknál alkalmaznak. 2015-ben, a világszerte használatban lévő szélturbinák 23%-ánál NdFeB ötvözetet alkalmaztak, ami tartalmazhatott még a neodímium mellett egyéb lantanoidákat, úgymint diszpróziumot, prazeodímiumot és terbiumot is. A maradék 77%-ban az elektromágneses generátorok vas és réz ötvözetekből állnak, melyek nem számítanak kritikus elemeknek [27]. Általánosságban a szélturbinák két kategóriába sorolhatók: a közvetlen meghajtásúak (direct-drive) valamint az áttétellel hajtott turbinák. A közvetlen meghajtású szélturbinák alacsony fordulatszámon működnek leghatékonyabban. Fő előnyeik a nagyobb összteljesítmény, kisebb tömeg és a kevesebb fenntartási költség [27]. Az áttétellel működő turbinák ellenben nagyobb fordulatszámon működnek hatékonyabban (kis turbinák esetén, < 5MW), valamint nem, vagy csak kis mennyiségben tartalmaznak ritkaföldfémeket [27]. Pavel és mtsai leírták,

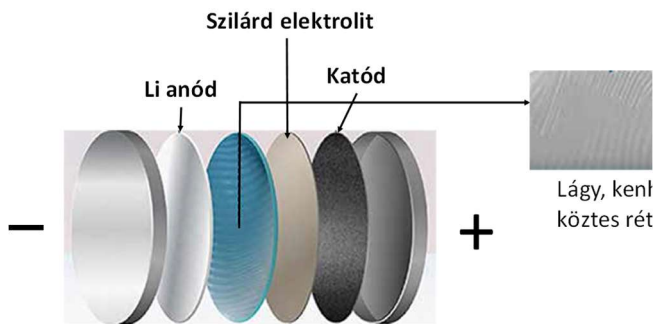
hogy az állandó mágnesek összetétele megváltozhat a jelenlegi 29-32% Nd/Pr és 3-6% Dy tartalomról 25% Nd/Pr és kevesebb, mint 1% Dy tartalomra 2020-ra [27]. A ritkaföldfémek közvetlen helyettesítése más elemekkel nehézségekbe ütközik, de manapság is intenzív kutatómunka folyik újfajta mágnesösszetételének kidolgozására, melynek nem függenek a ritkaföldfém-tartalmú állandó mágnesektől [27].

A természetes gázturbinák jellemzően még nem tekinthetők tökéletesen zöld energiát biztosító technológiának, azonban a tudományos társadalomban széleskörűen egyetértenek abban, hogy a természetes gázok, annak ellenére, hogy véges erőforrások, mégis környezetbarátabbak a szén alapú technológiáknál. A gázturbinák lapátjainak nagy centrifugális erőhatást és extrém hőmérsékleteket kell kibírniuk [28]. Az extrém körülményeknek való ellenállóképességet a lapátokon levő szuperötvözet bevonatokba beépített kritikus elemekkel lehet megvalósítani. A manapság elterjedt Ni-alapú szuperötvözetek tartalmaznak réniumot és hafniumot a hőállóképesség növelése érdekében [28,29]. Az ötvözetben a rénium mennyisége jóval nagyobb, mint a hafniumé, ezért kísérletek folynak annak helyettesítésére. A rénium tartalom csökkentése azért is fontos, mivel annak ára és beszerezhetősége a legbizonytalanabb. A rénium ára 2007-ben csúcspontot ért el, ennek hatására néhány nagyvállalat, köztük a General Electric (GE) elkezdett más módszerekkel gyártani, kivonni és újrahasznosítani a réniumot a

veszteségeik csökkentésére [30]. A rénum elem kritikus jellegét az is növeli, hogy a Re kitermelés mintegy 80%-a a rézbányászat melléktermékéből származik. A mostanában gyártott szuperötvözet bevonatokban a rénum mennyiségét a felére csökkentették vagy teljesen kivonták, azonban ezek az ötvözetek már nem teljesítettek olyan jól extrém körülmények között, hőellenállóképességük csökkent [31].

A környezetbarát közlekedés témakörén belül az elektromos járművek kritikus alkatrészeit érdemes vizsgálni, azon belül is a tüzelőanyag cellákat, mint energiaforrásokat és az állandó mágnesset tartalmazó motorokat. A zöld elektromos energiatermeléshez szükséges legelterjedtebb anyagok az átjárható polimer alapú ioncserélő membránok (PEM), szilárd-oxid tüzelőanyag cellák (SOFC), Li-ion akkumulátorok és a nikkkel-fém-hidrid akkumulátorok (NiMH). Napjainkban a PEM-et használó tüzelőanyag cellák uralják az elektromos jármű piacot, míg a SOFC-k alig vannak jelen. Másrészt jelenleg az NiMH akkumulátorok dominálnak a hibrid elektromos jármű piacon, azonban egyes előrejelzések alapján a hibrid autók mintegy 70%-a, a feltöltős vagy teljesen elektromos autók 100%-a fog Li-ion elemekkel üzemelni 2025-re [32]. Azonban még mindig fokozott figyelmet kell fordítani az állandó mágnesekben és a NiMH akkumulátorokban található ritkaföldfémekre, a Li-ion akkumulátoroknál a Li és a Co tartalomra, valamint a tüzelőanyag celláknál a platina tartalomra, mivel ezek az elemek kritikusnak

számítanak [33]. Az egyik legújabb kutatási irány a tüzelőanyag cellák területén belül az úgynevezett koordinációs polimer-üvegek fejlesztése, melyek kellően szilárd alapot biztosítanak a PEM tüzelőanyag celláknak. Japán tudósok [34] kifejlesztettek olyan polimer-üveg anyagokat, melyek megfelelően nagy belső protonvezetéssel rendelkeztek. A hagyományos tüzelőanyag cellákhoz képest a PEM alapú cellák nagyobb teljesítményt biztosítanak, könnyebbek és kisebbek. Azonban a hátrányuk, hogy a tökéletes protonvezetéshez a szilárd polimer membránnak tartalmaznia kell folyadékot a megfelelő működés szinten tartásához. Ez a vízigény hátrányosan hat a tüzelőanyagok hatékonyságára, ezért a kutatások fő célkitűzése szárazon is kiváló protonvezetést biztosító PEM kifejlesztése. Svéd és kínai kutatók [35] olyan nagyteljesítményű, szilárd elektrolitos lítiumion-akkumulátor kifejlesztésén dolgoznak, melyben a szilárd elektrolit mellé köztes réteggént fél-szilárd, kenhető kerámiaanyagot vittek fel. A kutatók $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ (LAGP) üveg/kerámia nanorészecskéket oszlattak el ionos folyadékban. Ez a köztes réteg megfelelő ionvezetést, nagy hőállóképességet illetve megfelelően stabil összekötő felületet biztosított a szilárd elektrolit és az elektródok között. A szilárd fázisú akkumulátorok alkalmazásánál az egyik legkritikusabb pont az elektród/elektrolit határfelület stabilitásának biztosítása, azonban ezzel a fejlesztéssel olyan akkumulátorok gyárthatók, melyek könnyebben hozhatók kereskedelmi forgalomba.



2. **ábra.** Újfajta, nagyteljesítményű, szilárd elektrolitos lítiumion-akkumulátor vázlatos felépítése.

Az energiahatékony világítástechnika témában három különböző típusú égőt érdemes tárgyalni a kritikus anyagok szempontjából: (1) kompakt fluoreszcens égők (CFL), (2) lineáris fluoreszcens égők (LFL), (3) fénykibocsátó diódák (LED). Ezek közül mindegyik energiahatékonyabb a hagyományos izzóknál. A világítástechnikában a legtöbb kritikus elem (főként a ritkaföldfém elemek) az égők foszfor tartalmában található [36]. A foszfort az égők belső felületére porlasztják, ezért a felhasznált kritikus elemek mennyisége az égők méretétől függ (főként az LFL esetében) [6]. Az európeum és az itrium együtt vörös, a terbium zöld míg maga az európeum kék színű foszfor vegyületet bocsát ki besugárzás hatására [37]. A LED-ek kevesebb ritkaföldfémeket tartalmaznak, mint a fluoreszcens fénycsövek, azonban gallium és indium is található bennük, a félvezető diódákban [38,39].

Az eddigiekben tárgyalt környezetkímélő technológiákban használt kritikus elemek egy meghatározott mennyiségére mindenképpen

szükség van a hatékony teljesítményhez. Ez az alapmennyiség fontos abból a szempontból, hogy összehasonlíthassuk a különféle elemek hatékonyságát ugyanabban a technológiában illetve az ugyanazon kritikus anyagokat hasznosító hasonló/összevethető technológiák hatékonyságát. Például amikor azt nézzük, hogy a CdTe napelem panelek mennyi tellúrt tartalmaznak az adott rendszerben, előnyösebb a Te mennyiségét az előállított napenergiához viszonyítva megadni (tömeg/kW egységben), mint csupán az adott napelem panel tellúrtartalmát nézni. A zöld energia előállításához nélkülözhetetlen kritikus anyagok elérhetőségének és mennyiségének azonosítása az első lépés annak érdekében, hogy kiválaszthassuk az optimális technológiát, amelyik a legköltséghatékonyabb, és amelyik a legkevesebb káros környezeti, gazdasági és társadalmi következménnyel jár. Azonban a megfelelő mennyiségű kritikus anyagok elérhetőségén kívül szintén kifejezetten fontos az adott anyag minősége is, úgymint a tisztasága, kristályossági foka, fizikai és kémiai tulajdonságai.

Mérnökök egy jobb világért

A környezetbarát technológiákban használt nyersanyagok természetének jobb megértésével valamint azok környezetre, társadalomra gyakorolt hatásának figyelembe vételével illetve a hozzáférhetőség biztonságosságának, folyamatosságának biztosításával megoldásokat dolgozhatunk ki egy jobb és fenntarthatóbb világ elérésére. A megfelelő anyag kiválasztásához

széleskörű összefüggéseket vesznek figyelembe. Új termékek tervezésekor a cégek már egyre átfogóbban gondolják át a felhasznált anyagok minőségét és mennyiségét a hagyományos gyártási technológiákhoz képest. Figyelembe veszik az anyagok árát, minőségét, újrahasznosíthatóságát valamint még az ökológiai lábnyomát is a teljes életciklusa alatt. Már léteznek úgynevezett „anyagkiválasztó szoftverek”, melyek segítségével a mérnökök és tudósok könnyebben megtalálhatják az adott fenntartható technológiához és a maximális teljesítményhez optimális alapanyagot, melyek a legkevesebb káros környezeti és társadalmi hatást eredményeznek. Számos tanulmány [33-39] az alapján fontolja meg a megfelelő anyag kiválasztását, hogy az mennyiben járul hozzá a klímaváltozás hatásainak csökkentéséhez. Ezek a tanulmányok fontosak abból a szempontból, hogy segítségükkel szélesebb perspektívából láthatunk rá, hogy rendelkezünk e olyan mennyiségben az adott anyagból a környezetkímélő technológiák megvalósíthatóságához és fenntarthatóságához, mellyel bizonyos szint alá tudnánk csökkenteni a klímaváltozás káros hatásait. Alonso és mtsai [38] a szélturbinák és az elektromos járművek ritkaföldfém szükségleteit vizsgálták és kimutatták, hogy amennyiben az CO₂ koncentrációja 450 ppm alatt tartható az atmoszférában, akkor jelentősen megnőhet a kereslet a neodínium és a diszprózium iránt a közeljövőben. A keresletnövekedés nagysága elérheti a hétszerest neodíniumra illetve 26

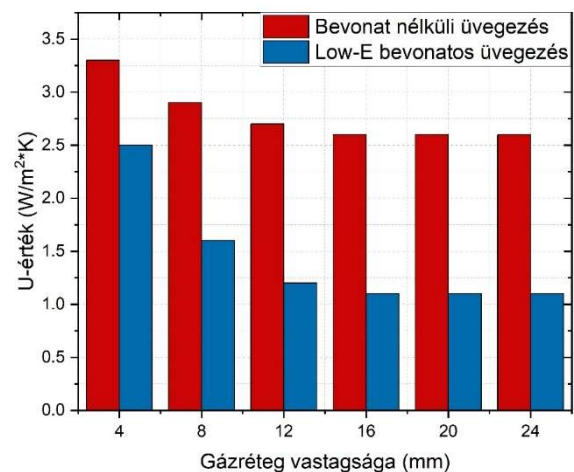
szorosost a diszpróziumra nézve 2035-re, a 2010-es adatokhoz viszonyítva. Jacobson és Delucchi [33] tanulmányukban elemzik elméleti szempontból annak a hatását, ha a világ teljes energiaellátását a környezetbarát szél-, víz-, és napenergia szolgáltatja. Az ehhez szükséges nyersanyagok elérhetőségét nézve arra a következtetésre jutottak, hogy főként a neodínium, platina és a lítium hozzáférhetősége korlátozná a technológiák megvalósíthatóságát. A fenti elemeket újra kellene hasznosítani, helyettesíteni illetve új lelőhelyeket keresni/találni. Bustamante és Gaustad [39] a CdTe napelem panelekben található tellúr hatását vizsgálták. Arra jutottak, hogy a Te hozzáférhetőségének a nehézsége akadályozhatja a CdTe napelemek elterjedését. Álláspontjukat azzal magyarázták, hogy a tellúr kritikus jellege főként abból ered, hogy a különböző technológiák melléktermékeként tudják csak előállítani és nem függ annak forrásának a mennyiségétől. A tellúr elem jelenlegi teljes ellátórendszerét nézve (amelyben melléktermék ásványként szerepel) úgy találták, hogy a tellúr elérhetősége nem fedezi kellőképpen az elvárt keresletet.

Alacsony emisszivitású ("Low-E") üvegevonatok a hőszigetelő üvegezésben

Az energiatakarékosság, illetve környezettudatosság szempontjából az épületek kedvező hőszigetelő képességének kialakítása kulcsfontosságú feladat, hiszen ezáltal mind az épület fűtésének energiaigényét, mind az

esetlegesen léggörbe jutó káros anyagok mennyiségét csökkenthetjük. Ennek megvalósítása során az épületek falai mellett fontos tényezők a nyílászárók, azon belül is az ablakok, ugyanis az ablaküvegen keresztül jelentős hőmennyiség távozik az épületből. E hőveszteség minimalizálására hőszigetelő üvegszerkezeteket (Insulated Glass Unit, röviden IGU) alkalmaznak az építőiparban, melyeket két vagy három, egymástól távtartókkal elválasztott üveglapból készítenek. Az üveglapok közötti térbe inert, rossz hővezető képességű gázt, legtöbbször argon-t, esetleg gázkeveréket töltenek. Az üvegezés hőszigetelő képességét mennyiségileg az U-val jelölt, úgynevezett hőátbocsátási tényező jellemzi, mely a vonatkozó szabványban [40] rögzített definíció szerint az üvegezés két oldala közötti egységnyi környezeti hőmérsékletkülönbség hatására létrejövő és állandósult állapotú hőáramsűrűséget jelenti, mértékegysége $\frac{W}{m^2 \cdot K}$. Az U-érték a fent idézett dokumentumban rögzített összefüggések segítségével egyszerűen számítható az üvegezést jellemző különböző paramétereiből (üvegtáblák száma, típusa és vastagsága, távtartók mérete, üvegbevonat és töltőgáz típusa, stb.) A 3. ábra kétrétegű, vagyis két síküvegből álló üvegezéseket jellemző U-értékeket mutat be különböző gázréteg vastagságok, vagyis különböző távtartó méretek mellett, továbbá bevonat nélküli és bevonatos üveglapok esetén. A számítások a

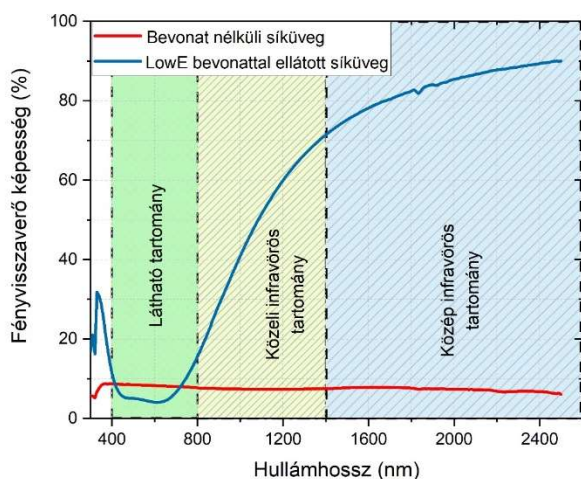
resources/tools/glass-analytics oldalon ingyenesen elérhető Guardian Glass Analytics Performance Calculator nevű programmal készültek, 4 mm vastag Guardian Extra Clear bevonat nélküli, valamint Guardian Clima Guard Premium 2 bevonatot tartalmazó síküvegtáblákat, továbbá argon töltőgázt feltételezve.



3. ábra: Bevonat nélküli és "Low-E" bevonatos üvegezések U-értékei

Az 3. ábrán látható trend azt mutatja, hogy a gázréteg vastagságának növelésével az üvegezés hőszigetelő képessége monoton javul, azonban az U-érték egy bizonyos gázréteg vastagságnál eléri minimumát, melynél jobban már pusztán e parameter változtatásával nem javítható. Ennek oka, hogy egy kritikus gázréteg vastagság elérése után a konvekciós hőáramlások jelentőssé válnak a gázrétegben, mely annak hőszigetelő képességét rontja [41]. Másrészt a gázréteg vastagításának technikai korlátját jelenti az a tény, hogy minél vastagabb az alkalmazott gázréteg, annál vastagabb az egész üvegezés, tehát annál nagyobb terhelést jelent az ablak

vasalatára. Az 3. ábráról leolvashatjuk, hogy az üvegezés hőszigetelő képessége jelentős mértékben, akár kétszeresére is növelhető, ha bevonat nélküli üvegtáblák helyett alacsony emisszivitású (low emissivity, röviden “Low-E”) bevonattal ellátott üveglapokat alkalmazunk. Az ilyen típusú üvegbevonatok funkciós rétege általában egy vékony fémréteg [42] (pl.: ezüst vagy nikkel-króm ötvözet), mely elektromos vezetőképessége révén jelentős mértékben csökkenti az elektromágneses sugárzás bevonatos üvegterméken történő áthatolását az infravörös tartományban, vagyis egyfajta hőtükörként funkcionál. Ezt a viselkedést mutatja be a 4. ábra, ahol bevonat nélküli, valamint “Low-E” bevonattal ellátott síküveg Perkin Elmer Lambda 1050 típusú spektrofotométerrel rögzített spektrális fényvisszaverő képességét láthatjuk a 300 nm-től 2500 nm-ig terjedő hullámhossz tartományban.



4. ábra: Bevonat nélküli és “Low-E” bevonattal ellátott síküveg spektrális fényvisszaverő képessége

Természetesen ablaküvegezés esetén nagyon fontos, hogy a hőszigetelő képesség javulása mellett ne veszítsen az ablak az átlátszóságából, vagyis a spektrális fényvisszaverő képessége a látható tartományban ne legyen magasabb, mint a bevonat nélküli üvegé. Ez a feltétel egyrészt az említett funkciós réteg vastagságának optimalizálásával érhető el, hiszen a rétegnek elég vastagnak kell lennie a jó hőszigetelő képesség biztosításához, ugyanakkor elég vékonynak ahhoz, hogy az üvegezés fényáteresztése a látható tartományban magas maradjon. Mivel a funkcionális fémréteg általában érzékeny, így annak védelme érdekében a réteget sohasem egyedül, hanem egy speciális szendvicsstruktúrában viszik fel az üveg felületére, melynek sematikus felépítése a 5. ábrán látható. A funkcionális réteg korrózióval, illetve mechanikai behatásokkal szembeni védelmét közvetlenül a réteg alatt, illetve fölött elhelyezkedő, úgynevezett védőrétegek biztosítják. Az alsó illetve felső dielektrikum rétegek feladata továbbá a bevonatos üvegtermék optikai tulajdonságainak, leginkább a spektrális fényáteresztő és a 4. ábrán bemutatott fényvisszaverő képességének, valamint a termék színének hangolása. Az alsó dielektrikum réteg felel emellett a rétegszerkezet hordozóhoz való tapadásáért, míg a felső rétegeknek kiemelt szerepük van a termék

mechanikai ellenállóképességének biztosításában.



5. ábra: Tipikus "Low-E" rétegszerkezet sematikus felépítése

Nitrid kerámiák környezetkímélő előállítási technológiája

Az alumínium-oxinitrid (AlON) kerámiaanyagok hő- és kémiai stabilitása rendkívüli, éppen ezért széleskörűen alkalmazzák különféle iparágakban. Habár napjainkban a megnövekedett ipari kereslet következtében intenzív fejlesztések és kutatások folynak AlON-kerámiák előállítására, még mindig igény van olyan átfogó kutatásra, újfajta porszintézis és megmunkálás kidolgozására, melynek segítségével költséghatékonyabban és nagyobb mennyiségben lehetne előállítani tömör, nagyszilárdságú átlátszó kerámiákat. Emellett, a szinterelési körülmények és az átmeneti folyadékfázisú szinterelés optimalizálása is szükséges lépés. Az utóbbi években számos különböző módszert dolgoztak

ki kutatócsoportok tömör, polikristályos, transzparens AlON kerámiák gyártására [43-57]. McCauley [43] és mtsai munkájukban Al_2O_3 -AlN porkeverék reakciószinterelését végezték el. Ezt a technológiát más kutatócsoportok is gyakran alkalmazzák [56-58]. Az egyszerű szinterelés, a nagynyomású szinterelés valamint a nagynyomású izosztikus szinterelés során AlON port használnak pórusmentes, tömör, átlátszó AlON kerámiák kialakítására. Az előzőekben említett módszerek fő hátránya a magas szinterelési hőmérséklet és a hosszú szinterelési idő, így gazdaságosság szempontjából előnyös lehet ezek csökkentése illetve lerövidítése anélkül, hogy a kerámia mechanikai tulajdonságaira káros hatással lenne.

Összegzésképpen elmondható, hogy az anyagok kritikus jellege és kritikusságának mértéke egy dinamikus változó skála, amely sok tényezőtől függ. A környezetkímélő technológiák fejlődésével az anyagok besorolása szintén változhat. Új technológiák kidolgozásakor illetve új anyagok, anyagösszetételek kiválasztásakor, bevezetésekor körültekintőnek kell lenni és nem csak az adott nyersanyag árát, mennyiségét és hozzáférhetőségét kell figyelembe venni, hanem a fenntarthatóságot is. Kiemelten fontos ezen kívül a környezetkímélő technológiákhoz nélkülözhetetlen nyersanyag szükségletek folyamatos nyomon követése, feltérképezése és az előre tervezés, kockázatelemzés annak érdekében, hogy ezen technológiák megvalósíthatók legyenek és folyamatosan,

fenntarthatóan működjenek. Csakis ez által teremthető meg a zöldebb, biztonságosabb, fenntarthatóbb világ.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkát az „ALON kerámiák környezetkímélő előállítására és vizsgálatára” NKFI-129976 NNE projekt támogatta.

Irodalom

- [1] US EPA, Global Greenhouse Gas Emissions Data, 2019, <https://www.epa.gov/>
- [2] IPCC, Climate Change Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- [3] Baumert, K., Herzog, T., and Pershing, J., Navigating the Numbers: Greenhouse Gas Data and International Climate Policy; Chapter 4, World Resources Institute, 2005, pp. 21-24.
- [4] United Nations Development Programme, 2018, Sustainable Development Goals, <http://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals.html>
- [5] Stamp, A., Lang, D., and Wäger, P., Environmental Impacts of a Transition toward E-Mobility: The Present and Future Role of Lithium Carbonate Production, *Journal of Cleaner Production*, 2012, **23**(1), pp. 104-112.
- [6] Bauer, D., Diamond, D., Li, J., Sandalow, D., Telleen, P., Wanner, B., US Department of Energy Critical Materials Strategy, 2011,

https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf

- [7] Graedel, T., Nuss, P., Employing Considerations of Criticality in Product Design, *Journal of Materials*, 2014, **66**(11), pp. 2360-2366.
- [8] Erdmann, L., Graedel, T., Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses, *Environmental Science and Technology*, 2011, **45**(18), pp. 7620 - 7630.
- [9] Olivetti, E., Ceder, G., Gaustad, G., Fu, X., Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals, *Joule*, 2017, **1**(2), pp. 229-243.
- [10] A. McWilliams, “Large and advanced battery technology and markets” BCC Research Report FCB024H, May 2020.
- [11] Chakarvarty, U., , Renewable Energy Materials Supply Implications, *IAEE Energy Forum*, 2018 pp. 37-39.
- [12] Woodhouse, M., Goodrich, A., Margolis, R., James, T., Dhere, R., Gessert, T., Barnes, T., Eggert, R., and Albin, D., Perspectives on the Pathways for Cadmium Telluride Photovoltaic Module Manufacturers to Address Expected Increases in the Price for Tellurium, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, **115** (Supplement C), pp. 199-212.
- [13] Shapley, 2011, Thin Film Solar Cells, <http://butane.chem.uiuc.edu/pshapley/Environmental/L9/3.html>
- [14] Chang, Y., 2014, Suppressing Lossy-Film-Induced Angular Mismatches between

- Reflectance and Transmittance Extrema: Optimum Optical Designs of Interlayers and Ar Coating for Maximum Transmittance into Active Layers of Cigs Solar Cells, *Optics Express*, **22**(1), pp. A167-A178.
- [15] Freiman, S., 2007, Global Roadmap for Ceramic and Glass Technology, The American Ceramic Society, John Wiley& Sons, Hoboken, NJ, USA. ISBN:9780470104910.
- [16] Habib, K. and Wenzel, H., 2014, Exploring Rare Earths Supply Constraints for the Emerging Clean Energy Technologies and the Role of Recycling, *Journal of Cleaner Production*, **84** (Supplement C), pp. 348-359.
- [17] Hoenderdaal, S., Tercero Espinoza, L., Marscheider-Weidemann, F., and Graus, W., 2013, Can a Dysprosium Shortage Threaten Green Energy Technologies?, *Energy*, **49** (Supplement C), pp. 344-355.
- [18] Biello, D., 2010, Rare Earths: Elemental Needs of the Clean-Energy Economy, <https://www.scientificamerican.com/article/rare-earths-elemental-needs-of-the-clean-energy-economy/>
- [19] Balachandran, G., 2014, Case Study 1 - Extraction of Rare Earths for Advanced Applications, *Treatise on Process Metallurgy*, **3**, pp. 1291-1340.
- [20] Pavel, C., Marmier, A., Tzimas, E., Schleicher, T., Schuler, D., Buchert, M., Blagoeva, D., 2016, Critical Raw Materials in Lighting Applications: Substitution Opportunities and Implication on Their Demand, *Phys. Status Solidi A*, **11**, pp. 2937–2946.
- [21] EU SETIS, 2017, Photovoltaics Report, <https://setis.ec.europa.eu/>
- [22] McGehee, M., 2011, An Overview of Solar Cell Technology, <https://web.stanford.edu/group/mcgehee/presentations/McGehee2011.pdf>
- [23] Helbig, C., Bradshaw, A., Kolotzek, C., Thorenz, A., and Tuma, A., 2016, Supply Risks Associated with CdTe and CIGS Thin-Film Photovoltaics, *Applied Energy*, **178**, pp. 422-433.
- [24] NREL, 2017, Copper Indium Gallium Diselenide Solar Cells, <https://www.nrel.gov/pv>
- [25] US DOE, 2017, Copper Indium Gallium Diselenide, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, <https://energy.gov/eere/solar/copper-indium-gallium-diselenide>
- [26] Rudolph, D., Olibet, S., Hoornstra, J., Weeber, A., Cabrera, E., Carr, A., Koppes, M., and Kopecek, R., 2013, Replacement of Silver in Silicon Solar Cell Metallization Pastes Containing a Highly Reactive Glass Frit: Is It Possible?, *Energy Procedia*, **43**(Supplement C), pp. 44-53.
- [27] Pavel, C., Lacal-Arántegui, R., Marmier, A., Schüler, D., Tzimas, E., Buchert, M., Jenseit, W., and Blagoeva, D., 2017, Substitution Strategies for Reducing the Use of Rare Earths in Wind Turbines, *Resources Policy*, **52**(Supplement C), pp. 349-357.
- [28] Moss, R., Tzimas, E., Willis, P., Arendorf, J., Tercero Espinoza, L., et al., 2013, Critical Metals in the Path Towards the Decarbonisation of the Eu Energy Sector; assessing Rare Metals

- as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies, European Commission Joint Research Centre Institute for Energy and Transport,
<https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/505c089c-7655-4546-bd17-83f91d581190>.
- [29] John, D., 2015, Rhenium—a Rare Metal Critical to Modern Transportation, United States Geological Survey,
<https://pubs.usgs.gov/fs/2014/3101/>
- [30] Konitzer, D., Duclos, S., Rockstroh, T., 2012, Materials for Sustainable Turbine Engine Development, *Materials Research Society*, **37**, pp. 383-387.
- [31] Multi-Stakeholder Platform for a Secure Supply of Refractory Metals in Europe, Rhenium,
<http://prometia.eu/wp-content/uploads/2014/02/RHENIUM.pdf>
- [32] Diouf, B., and Pode, R., 2015, Potential of Lithium-Ion Batteries in Renewable Energy, *Renewable Energy*, **76**(Supplement C), pp. 375-380.
- [33] Jacobson, M., and Delucchi, M., 2011, Providing All Global Energy with Wind, Water, and Solar Power, Part I: Technologies, Energy Resources, Quantities and Areas of Infrastructure, and Materials, *Energy Policy*, **39**(3), pp. 1154-1169.
- [34] Ogawa, T., Takahashi, K., Nagarkar, S.S., Ohara, K., Hong, Y., Nishiyama Y. and Horike, S. *Chem. Sci.*, 2020, DOI:10.1039/D0SC01737J
- [35] Xiong, S., Liu, Y., Jankowski, P., Liu, Q., Nitze, F., Xie, K., Song, J. and Matic, A., Design of a Multifunctional Interlayer for NASICON-Based Solid-State Li Metal Batteries, *Adv. Funct. Mater.* 2020, 2001444.
- [36] Punkkinen, H., Mroueh, U., Wahlström, M., Youhanan, L., and Stenmarck, A., 2017, Critical Metals in End-of-Life Products; Recovery Potential and Opportunities for Removal of Bottlenecks of Recycling, Nordic Council of Ministers,
<http://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1103956/FULLTEXT01> (Accessed Nov. 30, 2017).
- [37] Ku, A., Setlur, A., and Loudis, J., 2015, Impact of Light Emitting Diode Adoption on Rare Earth Element Use in Lighting Implications for Yttrium, Europium, and Terbium Demand, *The Electrochemical Society*, **24**(4), pp. 45-49.
- [38] Alonso, E., Sherman, A., Wallington, T., Everson, M., Field, F., Roth, R., and Kirchain, R., 2012, Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies, *Environmental Science and Technology*, **46**(6), pp. 3406-3414.
- [39] Bustamante, M. and Gaustad, G., 2014, Challenges in Assessment of Clean Energy Supply-Chains Based on Byproduct Minerals: A Case Study of Tellurium Use in Thin Film Photovoltaics, *Applied Energy*, **123**, pp. 397-414.
- [40]. Építési üveg. A hőátbocsátási tényező (U érték) meghatározása. Számítási módszer. Magyar szabvány, MSZ EN-673, 1999.
- [41] I. Berencsi, M. Bereznai and G. Vikor, "Alacsony emissziós üvegek gyártása," Magyar Építőipar, no. 6, pp. 229-232, 2009.

- [42] S. Richter, N. Lesch and P. Karduck, "Characterization of a heat-insulating coating on floatglass by sputter-assisted EPMA," *Surface and Interface Analysis*, no. 30, pp. 260-263, 2000.
- [43] J.W. McCauley, P. Patel, M. Chen, G. Gilde, E. Strassburger, B. Paliwal, K.T. Ramesh, D.P. Dandekar, AlON: A brief history of its emergence and evolution, *J. Eur. Ceram. Soc.* 29. (2009) 223–236.
- [44] J.W. McCauley, N.D. Corbin, Phase Relations and Reaction Sintering of Transparent Cubic Aluminium Oxynitride Spinel (AlON), *J. Am. Ceram. Soc.* 62. (1979) 476–479.
- [45] J.W. McCauley, Structure and Properties of Aluminum Nitride and AlON Ceramics. Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground, (2002) MD 210053069.
- [46] Y. Shana, Z. Zhang, X. Suna, J. Xua, Q. Qin, J. Li, Fast densification mechanism of bimodal powder during pressureless sintering of transparent AlON ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.* 36. (2016) 671–678.
- [47] N. Zhang, B. Liang, X.Y. Wang, H.M. Kan, K.W. Zhu, X.J. Zhao, The pressureless sintering and mechanical properties of AlON ceramic, *Mat. Sci. Eng. A*, 528 (2011) 6259–6262.
- [48] N. Jiang, Q. Liu, T. Xie, P. Ma, H. Kou, Y. Pan, J. Li, Fabrication of highly transparent AlON ceramics by hot isostatic pressing post-treatment, *J. Eur. Ceram. Soc.* 37 (2017) 4213–4216.
- [49] F. Chen, F. Zhang, J. Wang, H. Zhang, R. Tian, Z. Zhang, S. Wang, Hot isostatic pressing of transparent AlON ceramics with Y_2O_3/La_2O_3 additives, *J. Alloys Comp.* 650 (2015) 753–757.
- [50] J.M. Xue, Q. Liu, T. Xiu, L. Ma, M. Fang, L. Gui, Hot-pressed translucent aluminum oxynitride (AlON) ceramics, *Key Eng. Mater.* 368-372 (2008) 450–452.
- [51] Y. Shan, Z. Zhang, X. Sun, J. Xu, Q. Qin, J. Li, Further experimental investigation on fast densification mechanism of bimodal powder during pressureless sintering of transparent AlON ceramics, *Cer. Internat.* 43 (2017) 8195–8201.
- [52] F.C. Sahin, H.E. Kanbur, B. Apak, Preparation of AlON ceramics via reactive spark plasma sintering, *J. Eur. Ceram. Soc.* 32 (2012) 925–929.
- [53] X. Li, J. Huang, J. Luo, Progress and Challenges in the Synthesis of AlON Ceramics by Spark Plasma Sintering, *T. Indian Ceram. Soc.* 76/1 (2017) 14–20.
- [54] D. Zientara, M.M. Bucko, J. Lis, Dielectric properties of aluminium nitride-AlO materials, *J. Eur. Ceram. Soc.* 27 (2007) 4051–4054.
- [55] J. Zheng, B. Forslund, Carbothermal Synthesis of Aluminium Oxynitride (ALON) Powder: Influence of Starting Materials and Synthesis Parameters, *J. Eur. Ceram. Soc.* 15 (1995) 1087–1100.
- [56] M. Su, Y. Zhou, K. Wang, Z. Yang, Y. Cao, M. Hong, Highly transparent AlON sintered from powder synthesized by direct nitridation, *J. Eur. Ceram. Soc.* 35 (2015) 1173–1178.
- [57] Y.W. Kim, B.H. Park, H.C. Park, Y.B. Lee, K.D. Oh, F. Riley, Sintering, microstructure and

mechanical properties of AlON–AlN particulate composites, British Ceram. Trans. 97/3 (1998) 97–104.

[59] Y.W. Kim, H.C. Park, Y.B. Lee, K.D. Oh, R. Stevens, Reaction sintering and microstructural development in the system Al_2O_3 –AlN, J. Eur. Ceram. Soc. 21 (2001) 2383–2391.