



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

VI. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2025eko maiatzaren 28, 29 eta 30a
Bilbo, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 4.0

ZIENTZIAK ETA NATURA ZIENTZIAK

**Elektrolito solido hibrido berriak:
sare metal-organiko eta likido
ionikoen konbinazioa litio eta
sodio baterientzat**

*Alexander Mirandona-Olaeta,
Saloa Vaquero-Vílchez,
Eider Goikolea,
Idoia Ruiz de Larramendi Villanueva
eta Arkaitz Fidalgo-Marijuan*

203-210 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.vi.05.25>

ANTOLATZAILEA



BABESLEAK



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO



LAGUNTZAILEAK



Elektrolito solido hibrido berriak: sare metal-organiko eta likido ionikoen konbinazioa litio eta sodio baterientzat

Alexander Mirandona-Olaeta^{1,2}, Saloa Vaquero-Vílchez^{2,3}, Eider Goikolea²,
Idoia Ruiz de Larramendi², Arkaitz Fidalgo-Marijuan^{1,2}

¹BCMaterials, Basque Center for Materials, Applications and Nanostructures, Bld. Martina Casiano, 3rd. Floor, UPV/EHU Science Park, 48940 Leioa, Spain.

²Department of Organic and Inorganic Chemistry, University of the Basque Country (UPV/EHU), Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa, Spain.

³Department of Chemical and Environmental Engineering, Engineering School of Bilbao, University of the Basque Country (UPV/EHU), Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain
alexander.mirandona@ehu.eus

Laburpena

Litio ioizko bateriak (*lithium ion battery*, LIB) gehien erabiltzen diren bateriak dira. Haien onurak ugariak izan arren, alternatiba garbiago eta merkeago baten bilatzea areagotu da, eta hor nabarmentzen dira sodio ioizko bateriak (*sodium ion battery*, SIB). Hala ere, biek segurtasun-arazoak dituzte. Segurtasuna hobetzeko, bateria berrien artean elektrolito solidoen (*solid electrolyte*, SE) erabilera aztertzen ari da, ioiei elektrodoen artean mugitzen laguntzen dietenak eta, aldi berean, egonkortasuna bermatzen dutenak. Erronka nagusietako bat ioi-fluxu ona eta iraunkorra ahalbidetuko duen elektrolito bat aurkitzea da. Lan honetan, SE baten garapena da helburua, MOF (sare metal-organikoa) eta likido ionikoz (*ionic liquid*, IL) egina, bai sodiorako bai litiorako. MOFaren egiturak ioien mugimendua kontrolatzen laguntzen du eta ILak eroankortasuna hobetzen du. Material hauek segurtasuna, egonkortasuna eta errendimendua hobetzen dituzte, LIB eta SIB eraginkorragoak eta fidagarriagoak bihurtuz.

Hitz gakoak: Litio eta sodio bateria, elektrolito solidoa, sare metal-organikoa, likido ionikoa

Abstract

Lithium-ion batteries (LIBs) are the most used batteries. Although its benefits, the search for a cleaner and cheaper alternative has been rising, and that's where sodium-ion batteries (SIBs) come into place. However, both types face safety issues. To improve safety, among new battery approaches, there's been the use of solid electrolytes (SE), which help ions move between electrodes while ensuring stability. A major challenge is finding an electrolyte with good ion flow and durability. This work focuses on developing a SE made of MOF (Metal-Organic Framework) and ionic liquid (IL), both for sodium and lithium. The MOF's structure helps control ion movement and the IL improves conductivity. These materials enhance safety, stability and performance, making LIBs and SIBs more efficient and reliable.

Keywords: Lithium and sodium battery, solid electrolyte, metal-organic framework, ionic liquid

1. Sarrera eta motibazioa

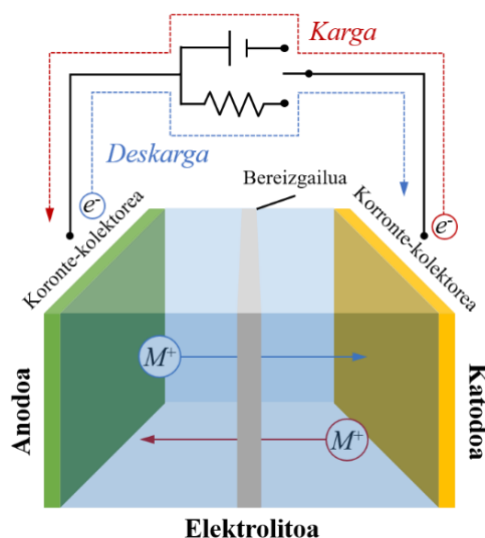
Gaur egun, energia-kontsumoa nabarmen hazi da mundu osoan, garapen ekonomikoaren eta biztanleriaren hazkundearen ondorioz. Hala ere, hazkunde horrek ingurumen- eta jasangarritasun-erronkak planteatzen ditu; izan ere, erabilitako energia gehiena erregai fosiletatik dator. Erregai fosil horien erabilgarritasuna mugatua da, eta haien erretzeak CO₂ isuriak sortzen ditu, klima-aldaketa larriago bilakatuz. Horregatik, energia-iturri berriztagarrietarako trantsizioa, hala nola eguzki-energia eta haize-energia, funtsezkoa da energia-eredu garbiago eta iraunkorrago baterantz aurrera egiteko.

Abantailak dituzten arren, energia berriztagarriek funtsezko arazo bat dute: ekoizpena aldizkakoa da, eguzki-argia eta haizea bezalako faktore naturalen menpe baitaude. Horrek esan nahi du eskaera handieneko uneetan ez dutela beti elektrizitaterik sortzen. Eragozpen hori

konpontzeko, beharrezkoa da energia biltegitratzeko sistemak izatea, eskari txikiko uneetan sortutako gehiegizko elektrizitatea gordetzeko, behar denean erabili ahal izateko.

Litio ioizko bateriak (LIBak) izan dira, besteak beste, azken hamarkadetan energia biltegitratzeko teknologia nagusia (Gutsh et al., 2022). Energia berriztagarrien integrazioa bultzatzeaz gain, gailu elektroniko eramangarrien eta ibilgailu elektrikoek garapenean ere giltzarri izan dira, non bateria eraginkorrak behar diren, biltegitratze-gaitasun handikoak eta epe luzerako egonkortasunekoak. 1. irudian irudikatzen den moduan, bateria hauen gelaxka batek bi elektrodoz, anodoa eta katodoa, eta hauen artean kokatzen den eta litio ioien mugimendua ahalbidetzen duen bereizgailu eta elektrolito batez osatuta daude (Baumann et al., 2019). Egoera solidoko baterien kasuan elektrolitoa eta bereizgailua bat dira. Sistema hauen eraginkortasuna ona da eta funtzionamendua bermatuta dago.

1. irudia. Metal ioizko gelaxkaren funtzionamenduaren irudi eskematikoa.



Hala ere, LIBek erronka garrantzitsuak dituzte. Kritikoenetako bat segurtasuna da; izan ere, karga-prozesuan dendrita izeneko egitura metalikoak sor daitezke, anodotik katodora hazten direnak eta bateriaren bereizgailua zulatu dezaketenak, zirkuitulaburrak eta gainberotzea eraginez. Muturreko kasuetan, suteak edo leherketak eragin ditzake. Gainera, litioa baliabide urria eta garestia da, erauzketa ingurumenaren gaineko kalte ugari eragiten ditu eta horrek aukera iraunkorrak eta eskuragarriak bilatzera eragin du.

Testuinguru horretan, sodio ioizko bateriak sortu dira etorkizun handiko aukera gisa (Goikolea et al., 2020). Bateria horiek litiokoek antzera funtzionatzen dute, baina sodioa erabiltzen dute litiokoaren ordez ioi mugikor gisa. Sodioa elementu ugaria da, merkeagoa eta erauzketan ingurumen-inpaktu txikiagoa duena. Hala ere, erronka tekniko batzuk ditu, hala nola litioarekin alderatuta tamaina eta pisu handiagoa izatea, eta horrek zaildu egiten du bateria barruan mugitzea eta energia biltegitratzeko gaitasuna murrizten du (Xu et al., 2017). Muga horiek gorabehera, sodio ioizko bateriak (SIBak) hautabide bideragarritzat jotzen dira, bereziki energia modu egonkorrean biltegitratzeko aplikazioetarako.

Metal ioizko baterien segurtasuna eta eraginkortasuna hobetzeko, elektrolito mota berriak aztertzen ari dira. Tradizionalki, bateriek elektrolito likidoak erabili izan dituzte, baina horiek sukoiak izan daitezke eta ihesak izan ditzakete bateriatik kanpora. Irtenbide gisa, elektrolito solidoen erabilera ikertzen ari dira. Elektrolito horiek egonkortasun termiko handiagoa eskaintzen dute, eta zirkuitulaburren arriskua murrizten dute, dendrita metalikoek hazkundearen aurrean hesi gisa jarduten baitute (Zhang et al., 2021).

Elektrolito solidoak ikertzeko hainbat materialen arteko aukera bat sare metal-organikoak (MOFak) dira. Ioi metalikoek eta molekula organikoek arteko loturez osatutako egitura porotsuak dira, aplikazioaren arabera propietate espezifikoekin diseina daitezkeenak. Baterien kasuan,

MOFek elektrolito likidoak izan ditzakete egitura porotsuaren barruan, egonkortasun mekanikoko eta eroankortasun ioniko handiko berebiziko konbinazio bat emanez (Zhao et al., 2018).

Lan honetan, Zn-MOF-74 hautatu da, likido ionikoak biltegitratzeko kanal hexagonal egokiak dituen MOF materiala (Wang et al., 2014). Funtzionaltasuna hobetzeko, likido ioniko espezifiko batekin konbinatu da (1-etil-3-metilimidazol bis(trifluorometilsulfonil)imida, [EMIM][TFSI]), gatz batekin aberastuta (NaTFSI sodioaren kasurako eta LiTFSI litioaren kasurako). Elektrolito hau MOFaren egiturarekin bateragarria delako aukeratu da eta bere propietate onuragarriengatik, hala nola lurrunkortasun txikiagatik eta egonkortasun kimiko handiagatik.

Ikerketa honen helburua material berri honen potentziala ebaluatzea da, solido-egoerako LIB eta SiBetarako elektrolito gisa. Horretarako, propietate fisiko-kimikoak, egonkortasun termikoa eta eroankortasun ionikoa aztertuko dira. Aurrerapen horiek funtsezkoak dira hurrengo bateriak sortzeko, litioarekiko mendekotasuna murrizteko eta energia biltegitratzeko sistemen segurtasuna eta iraunkortasuna hobetzeko. Material horiek gaur egungo erronka teknikoak gaintitzen badituzte, funtsezko zeregina izan dezakete energia-eredu garbi eta eraginkorrago baterako trantsizioan.

2. Arloko egoera eta helburuak

Azken urteotan, ikertzaileek arreta handia jarri dute sare metal-organiko porotsuen eta likido ionikoen konbinazioetan oinarritutako elektrolito solidoen garapenean, baterien segurtasuna eta errendimendua hobetzeko helburuarekin (Urgoiti-Rodriguez et al., 2022). MOFek egitura porotsu eta erregularrak eskaintzen dituzte, ioien garraioa errazteko, eta ILek eroankortasun ioniko handia eta egonkortasun termikoa eta kimikoa dituzte.

Ikerketa askok MOF egituren diseinuan zentratu dira, poroaren tamaina, forma eta funtzionaltasuna kontrolatzeko, ioien mugimendua optimizatzeko eta elektrolitoaren eta elektrodoen arteko interfasearen egonkortasuna hobetzeko (Jiang et al., 2023). Adibidez, MOF egiturak funtzionalizatu daitezke, ioien afinitatea eta mugikortasuna handitzeko, eta horrek baterien errendimendua hobetzen laguntzen du (Kim et al., 2021). Kasu honetan Zn-MOF-74 hautatu da kanalen egitura hexagonalagatik eta kanalen tamaina handiak ILa txertatzea ahalbidetzen duelako (Millward et al., 2005). MOFen izaera isolatzailea dela eta, beharrezkoa da eroankortasuna handitzea elektrolito gisa jardun dezan. Horretarako, kanaletan likido ioniko bat sartzea erabaki da, MOFak dendritak hazteko erresistentzia mekanikoa ekar dezan eta likido ionikoak sodio eta litio ioiak mugitzeko ingurunea eman dezan. Baita, sodio eta litio gatz bat disolbatu behar dela aipatu behar da (NaTFSI eta LiTFSI), sodio eta litio kopurua handitzeko, ioien mugikortasuna erraztuz.

Bestalde, ILen aukeraketa eta diseinua ere funtsezkoak izan dira elektrolito solido hibridoaren garapenean. ILen katioi eta anioien konbinazio desberdinak aztertu dira azken hamarkadetan, eroankortasun ionikoa, egonkortasun termikoa eta kimikoa, eta baterien tentsio-leihoarekin bateragarritasuna optimizatzeko (Tang et al., 2022). Kasu honetan, [EMIM][TFSI] likido ionikoa hautatu da, ILaren segmentuen tamaina bateragarria delako Zn-MOF-74ren poroekin, zati anionikoa (TFSI⁻) gatzaren berdina izateak abantaila ugari eskaintzen dituelako. Gainera, ikerketa-taldeak likido ioniko honetan duen aurretiazko esperientzia funtsezkoa izan da.

Lan honen ardatza MOF eta IL bat poroetan konfinatuz sortutako elektrolito solidoak garatzea da. Egoera solidoaren ikuspegi horrek disolbatzaile sukoiak erabiltzea saihesten du, ohiko elektrolitoetan erabiltzen diren disolbatzaile organikoek lotutako arriskuak murriztuz. MOFen sendotasunak dendritak haztea eragotziko du, eta ILa, berriz, sodio- eta litio-ioiei mugikortasuna emateaz arduratuko da. Na⁺ katioiak MOFean ondo antolatutako kanalen bidez mugituko dira, eta horrek sodio eta litioaren deposizio/askatze homogeneoagoa eta ordenatuagoa erraztuko du bateriaren karga/deskarga prozesuetan. Hau guztia kontutan izanik, lan honen helburu nagusia propietate fisiko-kimiko eta elektrokimiko egokiak aurkezten dituen IL@MOF material hibrido bi garatzea da (bat sodiorako eta beste bat litiorako) elektrolito gisa erabiltzeko egoera solidoko baterietan.

3. Emaizak eta eztabaida

Hasteko, MOFa sintetizatu zen, eta beste aldetik likido ionikoa sodio eta litio gatzekin asetu zen Na[EMIM][TFSI] eta Li[EMIM][TFSI] lortuz. Ondoren, IL:MOF pisu-erlazio bat baino gehiagoko laginak prestatu ziren (IL_x@MOF bezala izendatuak): 0.5:1, 0.6:1, 0.8:1 eta 1:1 sodioaren kasurako eta 0.5:1, 1:1 eta 2:1 litioaren kasurako.

3.1 Karakterizazio fisiko-kimikoa

Ostean, lagin horien karakterizazio fisiko-kimikoa burutu zen laginen propietate morfologikoak eta funtzionalak aztertzeko:

- 1) Espektroskopia infragorria: konposatu baten egitura espektroa ezagutu ahal da infragorriak xurgatzen dituen uhin luzeraren arabera. Teknika honen bidez MOFari dagozkion bandak identifikatu dira eta beste alde batetik ILari dagozkionak. Likido ioniko pisu-erlazioa handitu ahala bandak handitu egiten dira, MOF zein ILari dagozkionak, eta benetan nahi den produktua lortu dela frogatu da.

1. Taula. MOF eta ILari dagozkien IR espektroetan behatutako bandak.

Konposatua	Lotura	Uhin-zenbakia (cm ⁻¹)
Zn-MOF-74	$\nu_{\text{C-O-Zn}}$	880
	$\nu_{\text{(C-H) meta}}$	610
	$\nu_{\text{C-COOH}} = \nu_{\text{C-C(Ar)}}$	1560-1400
	$\nu_{\text{C-O}}$	1183, 1250
Na/Li[EMIm][TFSI]	$\nu_{\text{aC=C}}$	1055
	$\nu_{\text{aC-F}}$	1181
	$\delta_{\text{C-F}}$	742
	$\nu_{\text{sS=O}}$	1129
	$\nu_{\text{aS=O}}$	1331
	$\delta_{\text{S=O}}$	610

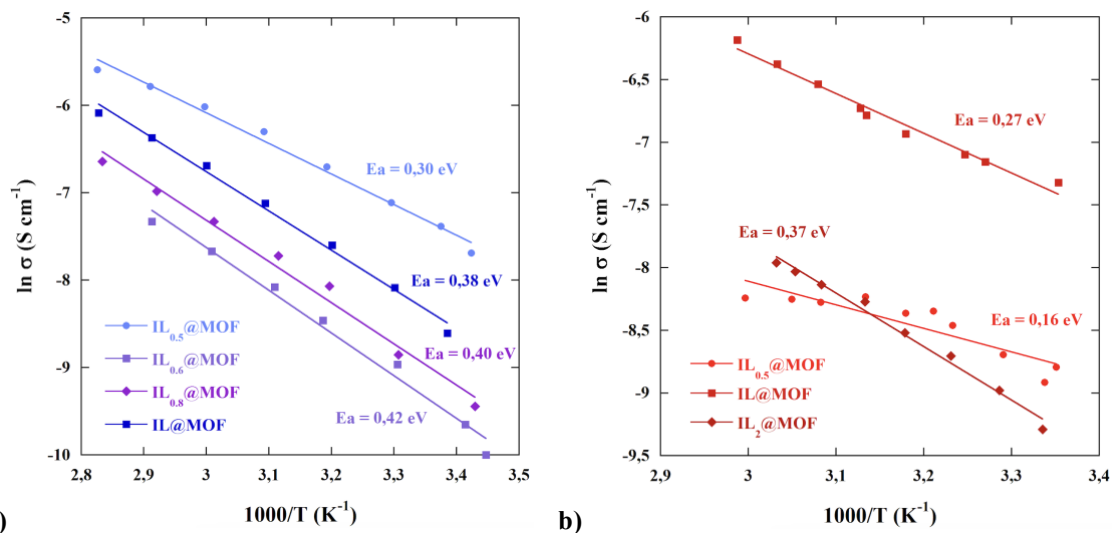
- 2) X izpien difrakzioa: laginen purutasuna eta kristalinitasuna aztertzeko. Lehenengo, difrakzio-patroiaren profila analisiaren bidez MOFa datu teorikoetara doitu da, eta lortutako gelaxka-parametroak bat etorri dira bibliografikoekin. MOFaren purutasuna egiaztatu ostean, beste laginen difrakzio-analisia burutu da: IL kantitatea handitu ahala maximoen intentsitatea handitzen da, konposatu ez-kristalino baten presentziagatik (likido ionikoa), ILa MOFaren kanalen barruan dagoela ziurtatzeko balio duena.
- 3) Analisi termograbitmetrikua eta ekortzearen kalorimetria diferentziala: laginen egonkortasun termikoa ezagutzeko. Bi deskonposizio-etapa behatu dira: lehenengoa, ur-hondarrarena; eta bigarrena, MOFarena. Zenbat eta likido ioniko kantitate gehiago izan laginak, ur-hondarraren ehunekoa txikiagoa izan da, MOFaren poroak gero eta beteago daudelako. Beste alde batetik, ekortzearen kalorimetria diferentzialak, gertatutako prozesuak exotermikoak edo endotermikoak diren adierazten du. Kasu honetan, MOFaren deskonposizio-etapa exotermikoak da.
- 4) Gasen adsortzioa: MOFaren azalera espezifiko determinatzeko erabili den teknika, 1123 m²/g-ko balioa lortu da. Eta, beste aldetik, IL_{0.5}@MOF (sodioaren kasurako) eta IL@MOF (litioaren kasurako) laginen azalera lortu da: 62 eta 0 m²/g, hurrenez hurren. Bi

datu hauekin ondo ikusten da MOFaren azalera espezifiko ia osoa ILz beteta dagoela, txertaketa ondo gertatu dela egiaztatuz.

Laginen karakterizazio fisiko-kimikoa burutu ostean, benetan nahi den konposatua lortu dela ziurtatuta eta IL MOFaren kanaletan ondo txertatu dela ikusita, laginen karakterizazio elektrokimikoa gauzatu da lortutako laginak batera baterako erabilgarriak diren edo ez frogatzeko.

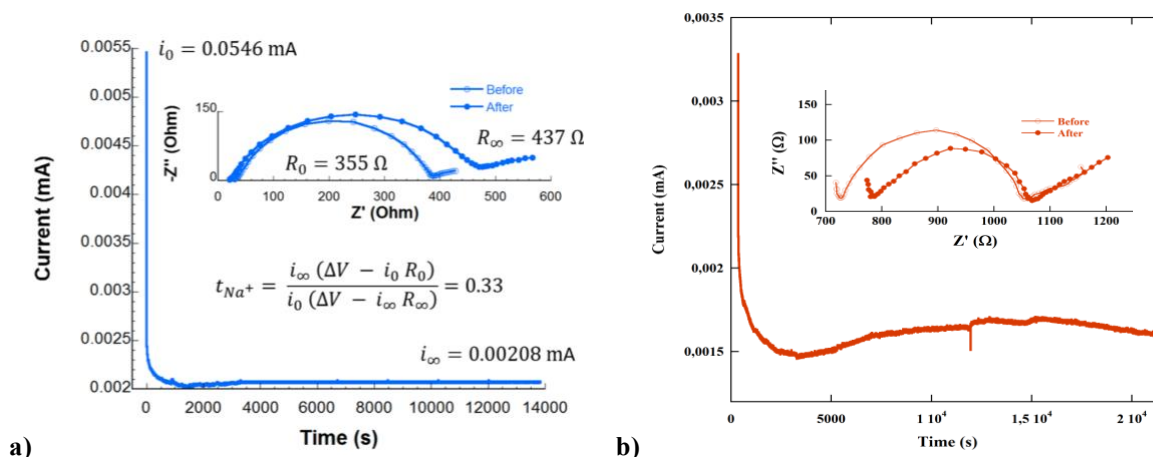
Prestatutako IL@MOF materialen eroankortasun ionikoa determinatzeko, inpedantzia elektrokimikoaren espektroskopia (EIS) teknika erabili da, laginen pastillak eginez eta neurketa gelaxkan perturbazio bat aplikatuz. Sodioaren kasurako, $IL_{0.5}@MOF$ laginaren emaitzak izan dira onenak, giro tenperaturan $4.58 \cdot 10^{-4}$ S/cm lortuz. Bestalde, litioaren kasurako, IL@MOF laginak lortu ditu emaitza hoberenak, giro tenperaturan $6.6 \cdot 10^{-4}$ S/cm lortuz. Bibliografiako beste datuekin alderatuz, oso balore on bat dela ikusi da. Interakzio kimikoen bidez, TFSI⁻ anioiak immobilizatu daitezke MOFen gune metaliko irekietan, Na⁺ eta Li⁺ ioiak erraz mugi daitezke MOFaren egitura mikroporotsuan zehar. IL gehitzeak MOFen kanaletan duen eragina aztertzeke, gertatzen ari diren mekanismo moten adierazpen bat aktibazio-energiaren (E_a) kalkulua izan daiteke. Emaitzek erakusten dute litioaren kasurako E_a eta IL-aren arteko erlazioa lineala dela. Sodioaren kasurako E_a ez dator bat IL kantitatearekin. Hori ioien koordinazio-ingurunean izandako aldaketaren adierazgarri izan daiteke. E_a -k apur bat handiagoak dira sodio-sistemen kasuan, sodio katioiaren tamaina handiagoa kontuan hartuta espero zitekeen emaitza izanik. Kasu guztietan, E_a balioak 0.4 eV edo txikiagoak dira (2. irudia), eta horrek eroankortasun ionikoa jauzi-mekanismo bati dagokiola adierazten du; hau da, ioiak gune aktiboen artean saltoka mugitzen dira, eta gune horiek likido ionikoaren zatiekin lotuta egon daitezke. Hala ere, ezin da baztertu ibilgailu-mekanismoaren ekarpen jakin bat, non ioiak disolbatzaile molekulekin batera bidaiatzen duten. Kasu horretan, E_a askoz ere handiagoa izango litzateke, elkarrekin migratu behar duten espezieen tamaina handia dela eta.

2. irudia. (a) Sodio eta (b) litio laginen eroankortasunaren tenperaturarekiko bilakaera, MOFari gehitutako IL kantitatearen arabera.



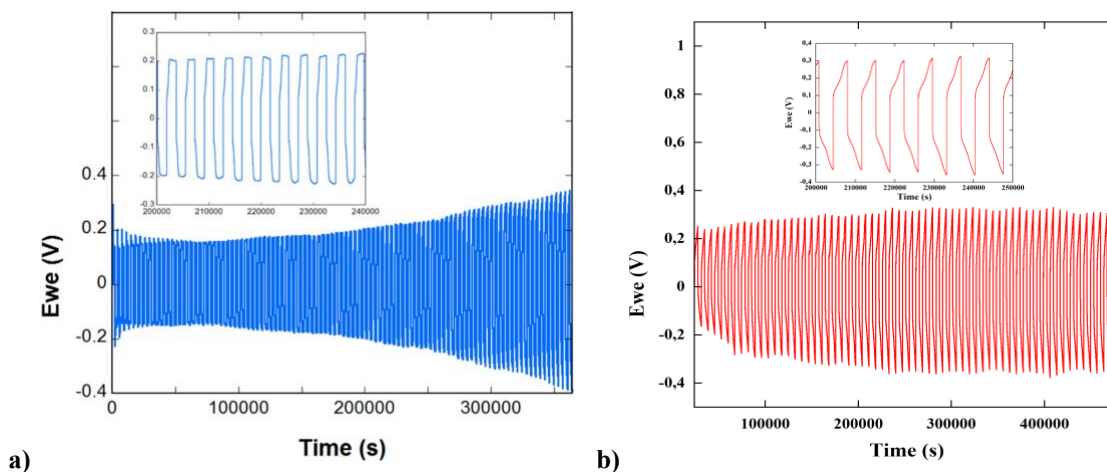
Garrantzitsua da kontuan hartzea ioi-eroankortasuna neurtzean sisteman dauden ioi guztiak hartzen direla kontuan (Na⁺/Li⁺, [EMIm]⁺ eta [TFSI]⁻), baina SE bateria batean integratzeko, Na⁺/Li⁺ ioien mugikortasuna balioestea komeni da. Ildo horretan, sodio eta litio ioien transferentzia-zenbakia (t_M^+) zein den jakiteko, polarizazio-azterketa egiten da. 3. irudian ikus daitezkeen datuetatik abiatuta, t_M^+ kalkula daiteke, 0,33 eta 0,47ko balioak lortuz sodio eta litioaren kasurako. Berriz ere, sodio ioien mugikortasuna txikiagoa dela litioarenarekin alderatuta ikusten da. Portaera hori sodio ioien tamaina handiagori egotzi dakiok. Hala ere, erregistratutako transferentzia-balioak oso lehiakorak dira metal ioizko baterietan ezartzeko ikuspegitik.

3. irudia. (a) Sodio eta (b) litio laginen denbora-mendeko korrante erantzuna 10 mV-ko DC polarizazioa aplikatzean, giro-tenperaturan. Txertaketa: polarizazioaren aurretik eta ondoren neurtutako inpedantzia-espektoak.



Bestalde, materiala baterietan integratzeari dagokionez, beste faktore kritiko bat da dendriten hazkundera saihesteko eta bateriaren beraren segurtasuna eta osotasuna mantentzeko oztopo fisiko gisa jarduteko gaitasuna. Hesi-efektu hori aztertzeko, *stripping/plating* azterketa bat egin da, $0.1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ -ko korrante-dentsitatean (4. irudia). Sodioaren kasuan, elektrolito solidoak 200 ordu baino gehiagoko ziklatu-galvanostatikoa jasaten ditu $\text{Na}|\text{IL}_x|\text{MOF}|\text{Na}$ motako gelaxka simetrikoetan giro-tenperaturan, barne-zirkuitulaburrik ikusi gabe, eta horrek hesi-efektu on bat esan nahi du dendriten hazkunderako. Litioaren kasuan, gelaxka simetrikoak 1000 ordu baino gehiagoko ziklatu-galvanostatikoa jasaten ditu.

4. irudia. Ziklatu galvanostatikoaren profila gelaxka simetrikoetarako $0.1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ -ko korrante-dentsitatean: (a) sodio eta (b) litio.



Na^+ garraioa aldekoa dela eta materiala dendritak haztea saihesteko gai dela ezarri ondoren, potentzial-leihoaz aztertzen da, degradaziorik jasan gabe lagina erabili ahal izateko. Potentzial-leihoak baterian erabil daitezkeen material motak zehazten ditu. Elektrodoen arteko potentzial-diferentzia zenbat eta handiagoa izan, orduan eta handiagoa izango da bateriaren potentzia (potentzia bateria baten tentsioaren biderkadura da, duen ahalmenagatik). Horretan oinarrituta, elektrolitoak mugatutako potentzial-leihoaz ahalik eta handiena izatea komeni da, potentzial handiagoko katodoak erabiltzeko aukera emanez. Sodioaren kasurako lortutako balioa 0-7V artekoa den bitartean, litioaren kasuan 7.5V arte iristen da.

4. Ondorioak

Ikerketa honetan lortutako emaitzek argi erakusten dute Zn-MOF-74 eta likido ionikoen konbinazioak elektrolito solido gisa potentzial handia dutela, sodio eta litio ioizko baterien errendimendua eta segurtasuna hobetzeko aukera eskaintzen baitute. Sintesi-prozesuari dagokionez, disolbatzaile gisa ura erabiltzeak emaitza bikainak eman ditu, metodo hau jasangarriagoa eta energetikoki eraginkorragoa delarik. Gainera, X izpien difrakzioak baieztatu du lortutako konposatuak puruak direla eta likido ionikoa MOFaren poroetan modu egokian integratu dela. Bestalde, elektrolito solidoaren egonkortasun termikoa nabarmena da, 300-450 °C-ko tartean degradazio-prozesurik erakusten ez duelako, eta horrek material hau egoera solidoko baterietan erabiltzeko egokia bihurtzen du.

Eroankortasun ionikoaren ikerketari dagokionez, IL_x@MOF konbinazioaren kantitate optimoa zehaztea funtsezkoa izan da, eta emaitzek erakutsi dute 0.5:1 erlazioa sodioaren kasuan eta 1:1 erlazioa litioaren kasuan direla egokiak. Gainera, elektrokimikoki aztertutako parametroek adierazten dute material hauek dendriten hazkundera saihesteko gaitasuna dutela, eta horrek baterien bizitza erabilgarria luzatzen du. Nahiz eta eroankortasun optimoa lortzeko oraindik hobekuntzak egin behar diren, lortutako transferentzia-zenbakiak egoera solidoko beste elektrolito batzuekin alderatuta lehiakorrak dira, eta hori funtsezkoa da teknologia honen bideragarritasuna bermatzeko.

Beraz, lan honetan garatutako IL@MOF materialek aurrerapauso garrantzitsua dakarte energia biltegitratzeko teknologietan, segurtasuna, jasangarritasuna eta eraginkortasuna sustatuz. Material horiek egungo baterien errendimendu-mugak gainditzeko aukera eskaintzen dute, eta horrek etorkizuneko aplikazioetarako bide berriak irekitzen ditu.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

MOF eta ILetan oinarritutako elektrolito solidoen garapenean aurrerapen nabarmenak egin diren arren, oraindik hainbat erronka tekniko gainditu behar dira haien aplikazio industrialak erabat gauzatzeko:

- Eroankortasun ioniko handiagoa: Materialen optimizazioa beharrezkoa da, bereziki tenperatura baxuetan errendimendu optimoa bermatzeko.
- Interfasearen egonkortasuna: Elektrolitoen eta elektrodoen arteko interakzioak sakonago aztertu behar dira, baterien bizi-iraupena eta segurtasuna bermatzeko.
- Eskalatzea eta prozesatzea: Fabrikazio-prozesuak eraginkorrak izan behar dira, kostuak optimizatu eta industria-mailako aplikazioak errazteko.
- Egonkortasun kimikoa eta elektrokimikoa: Materialen tentsio altuekiko eta ziklo luzeekiko egonkortasuna sendotu behar da, erabilera praktikoa fidagarria izan dadin.

Aurrera begira, diziplina anitzeko ikuspegia behar da, materialen zientzia, kimika, fisika eta ingeniariak uztartuz, MOF eta IL konbinazioetan oinarritutako elektrolito solidoak energia biltegitratzeko teknologietan sendotzeko. Ikerketa honek baterien segurtasuna eta eraginkortasuna hobetzeko aukera berriak irekitzen ditu, energia biltegitratzeko iraultza jasangarri baterako bidean.

6. Erreferentziak

Baumann, A. E., Burns, D. A., Liu, B., & Thoi, V. S. (2019). Metal-organic framework functionalization and design strategies for advanced electrochemical energy storage devices. In *Communications Chemistry* (Vol. 2, Issue 1). Springer Nature. <https://doi.org/10.1038/s42004-019-0184-6>

- Goikolea, E., Palomares, V., Wang, S., de Larramendi, I. R., Guo, X., Wang, G., & Rojo, T. (2020). Na-Ion Batteries—Approaching Old and New Challenges. *Advanced Energy Materials*, 10. <https://doi.org/10.1002/aenm.202002055>
- Gutsch, M. & Leker, J. (2022). Global warming potential of lithium-ion battery energy storage systems: A review. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 52, 105030). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105030>
- Jiang, S., Lv, T., Peng, Y. and Pang, H. (2023). MOFs Containing Solid-State Electrolytes for Batteries. John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/advs.202206887>
- Kim, H. & Hong, C. S. (2021). MOF-74-type frameworks: tunable pore environment and functionality through metal and ligand modification. *CrystEngComm*, 23(6), 1377–1387. <https://doi.org/10.1039/D0CE01870H>
- Millward, A.R. & Yaghi, O.M. (2005). Metal–Organic Frameworks with Exceptionally High Capacity for Storage of Carbon Dioxide at Room Temperature. In *Journal of the American Chemical Society* (Vol. 127, Issue 51, pp. 17998–17999). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/ja0570032>
- Tang, X., Lv, S., Jiang, K., Zhou, G. & Liu, X. (2022). Recent development of ionic liquid-based electrolytes in lithium-ion batteries. In *Journal of Power Sources* (Vol. 542, 231792). ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231792>
- Urgoiti-Rodríguez M, Vaquero-Vílchez S, Mirandona-Olaeta A, Fernández de Luis R, Goikolea E, Costa CM, Lanceros-Mendez S, Fidalgo-Marijuan A and Ruiz de Larramendi I (2022), Exploring ionic liquid-laden metal-organic framework composite materials as hybrid electrolytes in metal (ion) batteries. *Front. Chem.* 10:995063. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.995063>
- Wang, L.J., Deng, H., Furukawa, H., Gándara, F., Cordova, K.E., Peri, D. & Yaghi, O.M. (2014). Synthesis and Characterization of Metal–Organic Framework-74 Containing 2, 4, 6, 8, and 10 Different Metals. In *Inorganic Chemistry* (Vol. 53, Issue, 12, pp. 5881–5883). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/ic500434a>
- Xu, G., Nie, P., Dou, H., Ding, B., Li, L., & Zhang, X. (2017). Exploring metal organic frameworks for energy storage in batteries and supercapacitors. In *Materials Today* (Vol. 20, Issue 4, pp. 191–209). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2016.10.003> [Get rights and content](#)
- Zhang, G., Shu, J., Xu, L., Cai, X., Zou, W., Du, L., Hu, S., & Mai, L. (2021). Pancake-Like MOF Solid-State Electrolytes with Fast Ion Migration for High-Performance Sodium Battery. *Nano-Micro Letters*, 13(1). <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00628-0>
- Zhao, R., Liang, Z., Zou, R., & Xu, Q. (2018). Metal-Organic Frameworks for Batteries. In *Joule* (Vol. 2, Issue 11, pp. 2235–2259). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.09.019>

7. Eskerrak eta oharrak

Eskerrak eman nahi dizkiogu Eusko Jaurlaritzari (IT1546-22 erreferentziadun Ikerketa Taldearen laguntzagatik) eta Zientzia, Berrikuntza eta Unibertsitate Ministerioari (MICIU/AEI/10.13039/501100011033 eta FEDER, UE) PID2023-151153OB-I00, PID2021-122940OB-C31 eta TED2021-130621B-C42 proiektuengatik.