

Eguzki-energia termikoa metatzeko materialetako emisibitate-esperimentuak

(Emissivity measurements in materials for solar thermal energy storage)

*Telmo Echániz¹, Iñigo González de Arrieta²,
Raquel Fuente¹, Irene Urcelay-Olabarria², Gabriel Alejandro López²,
Josu Mirena Igartua²*

¹ Matematika Aplikatua Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola (UPV/EHU)

² Fisika Aplikatua II Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea (UPV/EHU)

irene.urcelay@ehu.eus

DOI: 10.1387/ekaia.19721

Jasoa: 2018-05-15

Onartua: 2018-06-26

Laburpena: Emisibitate infragorria materialen propietate termofisiko bat da. Erradiazio elektromagnetikoa igortzeko materialek daukaten ahalmena adierazten du parametro horrek. Eguzki-energiaren industrian erabiltzen diren materialen emisibitatea neurtzea oso garrantzitsua da materialen eraginkortasuna handitzeko; izan ere, erradiazio bidez gertatzen diren bero-galeren kalkuluak egiteko eta galera horiek saihesteko, ezinbestekoa da emisibitatea. Emisibitatearen zehaztasun handiko neurketak egin dira UPV/EHUko puntako tresna bat erabiliz Mg-47Zn-4Al aleazio hirukoitz eutektikoan, zeina eguzki-energia termikoa metatzeko sistemetarako hautagai den.

Hitz gakoak: Emisibitatea, energia termikoa, energia-metaketa, espektroskopia infragorria.

Abstract: Infrared emissivity is a thermophysical property of materials which determines their capability to emit thermal radiation. Emissivity measurements are essential for calculating and minimizing thermal losses by radiation in many technological fields, such as solar energy and thermal storage. Accurate emissivity measurements performed with a singular equipment at the UPV/EHU are presented in the case of a eutectic ternary alloy (Mg-47%Zn-4%Al), which is a candidate for solar thermal-energy storage systems.

Keywords: Emissivity, thermal energy, energy storage, infrared spectroscopy.

1. SARRERA

Gaur egungo gizartean energia-eskaera gero eta handiagoa da eta, orain arteko energia-iturrien agortzeari aurre egiteko erronkan, energia berriztagarrien iturrien garapena ezinbestekoa da, gizarte iraunkorra lortzea helburu badugu. Ildo horretan, eguzki-energiaren papera funtsezkoa da. Energia-biltzaile diren eguzki-paneletan edota energia-metagailuetan erabiltzen diren materialen azterketa sakona egitea ezinbestekoa da teknologia horren eraginkortasuna handitzeko.

Eguzki-instalazio termikoetan kontuan hartu behar dira honako bi faktore oso garrantzitsu hauek: batetik, materialek ahalik eta erradiazio gehien xurgatu behar dute, hau da, eguzkitik datorren espektro elektromagnetikoaren tarte ikusgaian eta infragorri hurbilean materialen energia-xurgapenaren parametroa handia izan behar da; bestetik, metatutako energia gorde egin behar da, eta funts horretarako bero-islapen handia izan behar dute materialek, gertuko eta erdiko izpi infragorriei dagokienez, hau da, emisibitate txikia izan behar dute izpi mota horietarako. Beraz, energia-tarte ezberdinetarako propietate ezberdinak dituzten materialak dira interesgarri industria honetan [1]. Zoritxarrez, laneko tenperaturan selektiboak eta egonkorak diren materialen garapena erronka da oraindik ere [2, 3, 4, 5, 6].

Edozer motatako bero-galerek elektrizitatearen ekoizketaren kostu ekonomikoa handitzen dute. Beraz, alde horretatik ere, oso garrantzitsua da erradiazio bidez gertatzen diren bero-galerak ekiditea. Materialen efizientziaren eta erradiazio bidezko bero-galerak kalkulatzeko erabiltzen diren erduetan emisibitate-parametroa kritikoa da.

Gaur egunera arte, gatz inorganiko sinpleen nahasturetan oinarritu izan da [7, 8] energia-metatzearen teknologia. Materialen kostu baxua da gatz horiek erabiltzearen arrazoi nagusia. Gatzetan gertatzen diren tenperatura-aldaketei esker metatzen duten bero sorrean dautza bero-gordailu horiek. Hala ere, bi arazo nagusi ditu teknologia horrek: metatze-sistema oso handiak eta konplexuak erabili behar dira, batetik, eta, bestetik, etekina txikia da. Badira urte batzuk, gatzen ordez fase trantsiziodun materialak erabiltzeko aukera aztertzen ari dela. Kasu horretan fase-trantsizioari lotutako bero sorraren bidez egiten da metatzea [9, 10, 11, 12]. Lan honetan, Mg-Zn-Al aleazio hirukoitz eutektiko baten azterketaren emaitzak aurkezten dira, Mg-%47Zn-%4Al. Aleazioa osatzen duten osagai puruek baino fusio-tenperatura edota lurruntze-tenperatura txikiagoak dituzte aleazio eutektikoek. Aleazioaren egitura X izpiak eta mikroskopia elektronikoa erabiliz aztertu da, DSC kalorimentriaren bidez solido/likido trantsizioa detektatu da eta solido-fasean emisibitatearen azterketa sakona egin da.

2. OINARRI TEORIKOA

Temperatura ez-nuluko gorputz orok energia igortzen du erradiazioaren bidez. Giro-temperatura eta 2.000°C temperatura-tartean dauden objektuek batez ere izpi infragorriak igortzen dituzte.

Gorputz beltzak igorle perfektuak dira, hau da, baldintza esperimental berberetan dagoen (besteak beste temperatura bera daukan) beste edozer gorputzek baino erradiazio handiagoa igortzen dute. Edo, beste modu batean esanda: baldintza esperimental berberetan egonik ez dago gorputzik gorputz beltzak baino erradiazio handiagoa igortzen duenik. Hori dela eta, erreferenziako igorletzat hartzen dira.

Objektuek igortzen duten erradiazioa eta gorputz beltzak igortzen duen erradiazioaren arteko erlazioa emisibitateak adierazten du. Arestian esan den bezala, parametro hori funtsezkoa da bero-galeren kalkuluetan erradiazio bidezko galerak kontuan hartzeko, eta, hori horrela dela, emisibitatea ondo ezagutzea premiazkoa da eguzki-energiaren sektorean. Hortaz, emisibitate espektral normala neurtzen dugu, hau da, uhin-luzeraren funtzioan emana datorren eta igortze-angelua gainazalarekiko perpendikularra deneko emisibitatea:

$$\varepsilon_{N,\lambda} = \frac{L_l}{L_{gb}}. \quad (1)$$

Adierazpen horretan, L_l da laginak igortzen duen erradiazioa, eta L_{gb} , gorputz beltzak igortzen duena. Uhin-luzera guztiak kontuan hartuta igortzen den erradiazioa zenbatekoa den jakiteko, emisibitate normal totala kalkulatu da, $\varepsilon_{N,T}$, $\varepsilon_{N,\lambda}$ uhin-luzera guztietarako integratuz.

Tradizioz, zeharreko islapeneko neurketak giro-temperaturan eginez determinatu izan da emisibitatea, eta, ondoren, balio hori laneko tenperaturetara estrapolatu [13]. Hainbat lanetan ikus daitekeenez [14], estrapolazio horren bidez lortzen diren emaitzak ez datoz guztiz bat lan-tenperaturetako emisibitatearen balioekin. Beraz, gailuen lan-efizientzia hobetzea denez helburua, funtsezkoa da emisibitatearen balioen azterketa laneko tenperaturan egitea. Artikulu honetan, esperimentua laneko tenperaturetan egitea proposatzen dugu.

3. ESPERIMENTAZIO-TEKNIKA

CIC energiGUNEan sintetizatu da lagina [15]. Aleazioa sortzeko %99,94ko, %99,995ko eta %99,7ko purutasuneko Mg, Zn eta Al lingoteak erabili dira. Proporzio estekiometrikoan nahastu dira metalak, eta aluminazko arragoan jarri da nahastura, hermetikoki itxitako altzairu herdoilgaitzezko

erreaktorean eta argonezko atmosferan. Mufla-labe elektrikoan egon da lagina, 450°C-ko tenperaturan 10 orduz. Urtze-prozesuan, laginaren homogeneitatea bermatzeko, mugimendu mekanikoak aplikatu zaizkio laginari 30 minutuan behin. Giro-tenperaturara itzularazi dira laginak 10°C/min-ko hozte-abiaduran. Ondoren, aleazioari buelta eman eta hiru aldiz errepikatu da prozesua.

Aleazioaren egitura eta konposizioa egiaztatzeko, X izpien difrakzioa erabili da eta laginen gainazala elektroien bidezko ekorketa-mikroskopia erabiliz analizatu da. Solido/likido trantsizioa DSC (Differential Scanning Calorimetry) esperimentuen bidez detektatu da.

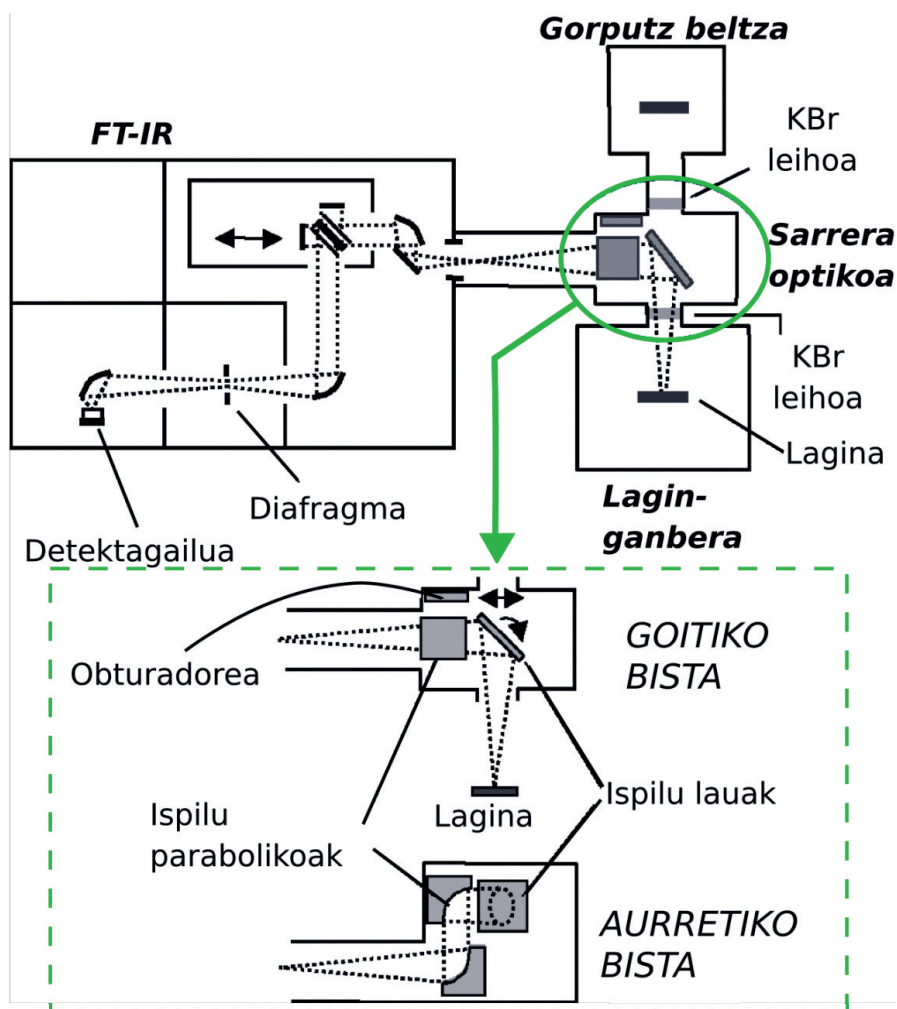
Emisibitateko esperimentuak Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitateko (UPV/EHU) HAIRL [16] erradiometroan egin dira. Aparatu horrek doitasun handiko neurketak egiten ditu eta, gainera, norabideko emisibitate espektrala neur daiteke bertan tenperaturaren funtzioan.

3.1. HAIRL

Duela urte batzuk, tenperatura handietako eta zehaztasun handiko emisibitatea neurtzeko erradiometroa sortu zen [16], High Accuracy Infrared Radiometry in Leioa (HAIRL), Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatean (UPV/EHU). Erradiometroaren eskema 1. irudian ikus daiteke. Erradiometroa erabiliz, materialen emisibitatea neur daiteke zuzenean, horretarako laginak berak igortzen duen erradiazioa eta erreferentziako gorputz beltzak igortzen duena konparatuz. Igorritako erradiazioaren uhin-luzeraren funtzioan, tenperaturaren funtzioan edota igorpen-angeluaren funtzioan egin daitezke neurketak.

Lau atal nagusi ditu tresnak:

- **Detekzio-sistema** Fourier-en transformazioko espektrometroa da, FT-IR. Neurketa espektralak, hots, uhin-luzeraren funtzioak, oso bizkor egitea ahalbidetzen du. Michelson interferometro batek eta InGaAs-zko edo DLaTGS-zko detektagailu batek osatzen dute.
- **Gorputz beltza** Gorputz beltza erositakoa da. Grafitozko barrunbe zilindriko bat berotzen duen labe batek, tenperatura neurtzen eta kontrolatzen dituzten bi termoparek eta tenperatura-kontrolagailu batek osatzen dute. Purgatze-sistema bat ere badu, uraren eta CO₂-aren absortzioak ekiditeko.
- **Sarrera optikoa** Laginetik zein gorputz beltzetik datorren erradiazioa sarrera optikoa moldatzen eta bideratzen du Michelson interferometrora paralelo heltzeko. Bi ispilu parabolikok eta ispilu lau batek osatzen dute. Tresnan sartzen den erradiazioa aukeratzen du ispilu lauak: laginetik edo gorputz beltzetik datorrena. Ispilu parabolikoen gorputz beltzetik eta laginetik datorren erradiazioa, goiko planoan daudenak, erradiometroaren planora jaisten dute.



1. irudia. HAIRL erradiometroaren irudi eskematikoa.

- **Lagin-ganbera** Berogailua daraman aluminazko portan jartzen da lagina eta hori guztia sartzen da lagin-ganberan. Horma bikoitzekoa da ganbera eta bi hormen artean dago hozte-sistema bat, hormak berotu ez daitezen. Gainera, barruko partea absorbantzia handiko pinturaz margotuta dago. Horrela, kutsadura-erradiazioa saihesten da.

Sarrera optikoa eta lagin-ganbera konektatuta daude, eta bietan aldi berean hutsa egiten da, airean gerta daitezkeen xurgapenak ekiditeko.

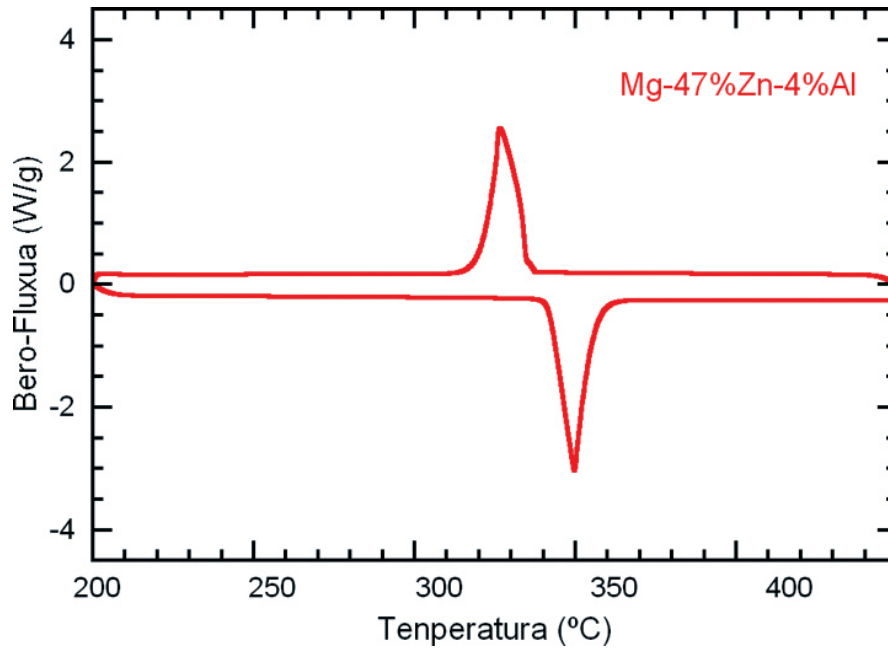
Laburbilduz, laborategian lor ditzakegun neurketa-baldintzak honako hauek dira: neurketak 50°C eta 1.000°C tartean egin daitezke eta laginaren igortze-angelua 0° eta 80° bitartean alda daiteke. Detektagailuak uhin-luzerak 0,83 eta 25 μm tartean bereizten ditu. Eta, azkenik, hutsean, airean edo atmosfera kontrolatuetan (argona, hidrogenoa...) neur daiteke. Erradiometroaren mugetako bat aipatzekotan, azter dezakeen lagin mota aipatu beharra dago: solido opakoen emisibitatea baino ezin da aztertu erradiometro honen bidez.

4. Mg-%47Zn-%4Al ALEAZIO HIRUKOITZA

Gaur egun, fase-aldaketak dituzten materialak dira eguzki-energia termikoa metatzeko hautagai nagusiak. Solido/likido trantsizioa duten hainbat material proposatu eta aztertu dira jadanik: gatz inorganikoak, parafinak, gatz hidratatuak edota gantz-azidoak [9, 10, 17, 18]. Aleazio eutektikoak bereziki interesgarriak dira. Material horiek energia-dentsitate handia daukate eta, gainera, bero-hornitze konstantea eta berreskuratze-tenperatura eta eroankortasun termiko handikoak dira. Eguzki-energia metatzen duten sistemetan erabiltzen diren bero-trukagailu sofistikuatuak sinplifikatzea ahalbidetzen dute.

Hala ere, fase-aldaketak dituzten materialen aplikazioak oraindik ere ikergai dira [15, 19, 20, 21]. Gutxienez 20 urteko zerbitzua eskaini behar dute eguzki-energia termikoa sorrarazten duten sistemek eta, denbora luze horretan, berotze/hozte ziklo anitz jasan behar dituzte materialek. Hori dela eta, energia metatzeko erabiltzen diren materialek portaera errepikakorra izan behar dute ziklo askotan. Ondorioz, propietate fisikoen egonkortasuna ere funtsezkoa da. Azkenik, beste baldintza bat da oxidatzen ez diren materialak erabiltzea; izatez ez da baldintza beharrezkoa baina bai oso egokia, horrela dispositiboetan babes-atmosferak erabiltzeari itzurtzen baitzaio.

Konposatu honetan egindako DSC neurketek trantsizio bakarra dagoela adierazten dute, hain zuzen ere, solido/likido trantsizioa 340°C inguruan (ikus 2. irudia). Horrek emisibitate-neurketak egiteko goi-tenperatura markatzen du, arestian argitu den bezala, HAIRL erradiometroan ezin direlako neurketak likidoetan egin. Badira antzeko konposizioa duten beste aleazio eutektiko batzuk, solido/likido fase trantsizioaz gain badutenak solido/solido trantsizio bat. Mg-51%Zn aleazio bikoitzaren kasuan oso interesgarria da solido/solido trantsizioa. Trantsizio hori 330°C-an gertatzen da, solido/likido trantsiziotik oso gertu (~350°C). Hori horrela izanik, laneko tenperaturetan bi trantsizio elkarrengandik horren hurbil egotean, trantsizioekin lotutako bero sorra handitzen da eta, ondorioz, materialak meta dezakeen energia ere handitzen da [22].

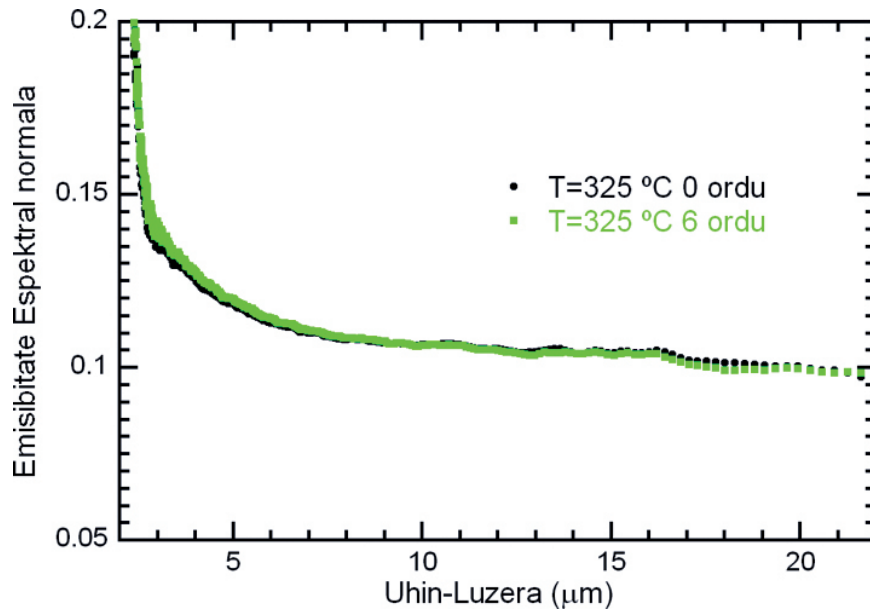


2. irudia. DSC neurketak. Aleazioak trantsizio bakarra du, solido/likido trantsizioa, 345°C-an.

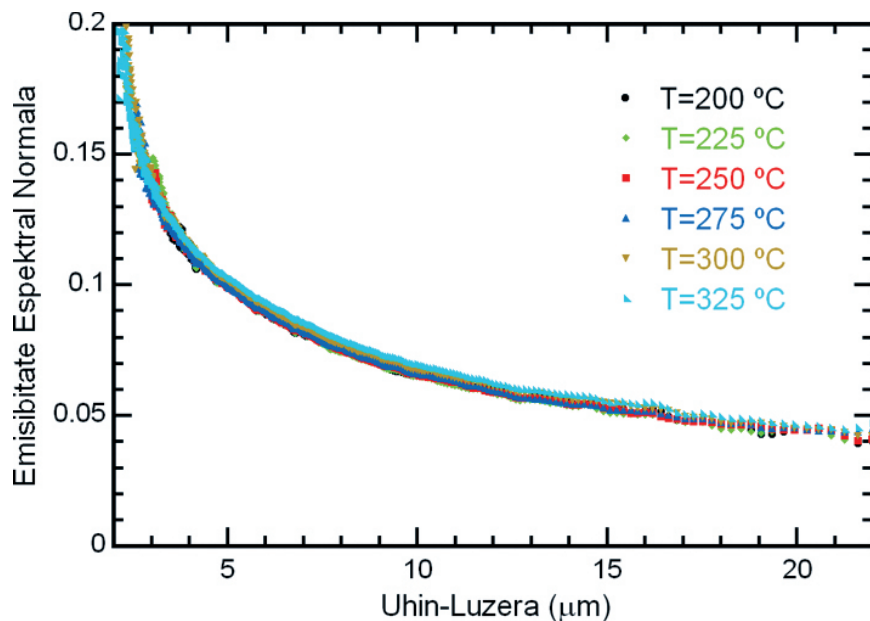
5. EMISIBITATEAREN NEURKETAK

Nahiz eta HAIRL tresnaren bidez ezin diren aztertu solido/likido trantsizio materialak edo likido-egoeran dauden materialak, berebat oso beharrezkoa izaten da solido-faseko propietate termikoak sakon aztertzea. Horretarako, behin Mg-%47Zn-%4Al aleazioaren egitura baieztatutakoan eta solido/likido trantsizioa detektatutakoan, propietate erradiatiboak aztertu dira 200°C eta fusio-tenperatura tartean. Horrez gain, emisibitatearen egonkortasun-analisiak egin dira eta, azkenik, laginaren oxidazioa ikertu da giro-atmosferan.

Argonezko atmosferan egin dira emisibitatearen lehenengo neurketak, laginaren oxidazioa ekiditeko. Materialak inolako estresik ez duela ziurtatzeko [23], lagina 325°C-raino berotu da, fusio-tenperaturaren azpitik, eta bi aldiz neurtu da emisibitatea: lehena, 325°C tenperaturara heldutakoan eta bigarrena, tenperatura horretara heldu eta 6 orduren burura, tenperatura berebean mantenduz lagina. 3. irudian ikus daitekeenez, emisibitatearen bi kurbek ez dute ezberdintasun adierazgarriak erakusten. Ondorioz, aurreantzean tenperaturaren funtzioan egindako emisibitatearen neurketetan laginean gerta litezkeen aldaketak bazter ditzakegu.



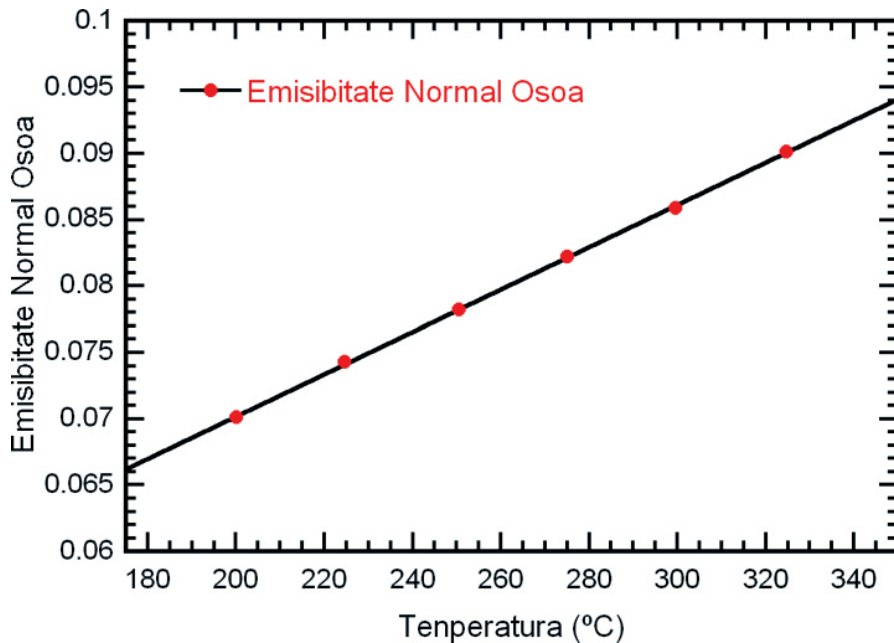
3. irudia. Emisibitate espektral normala 325°C -an neurtuta, temperatura horretara heldutakoan eta 6 ordu igaro ondoren, temperatura mantenduz.



4. irudia. Emisibitate espektral normala 200°C eta 325°C tartean neurtuta.

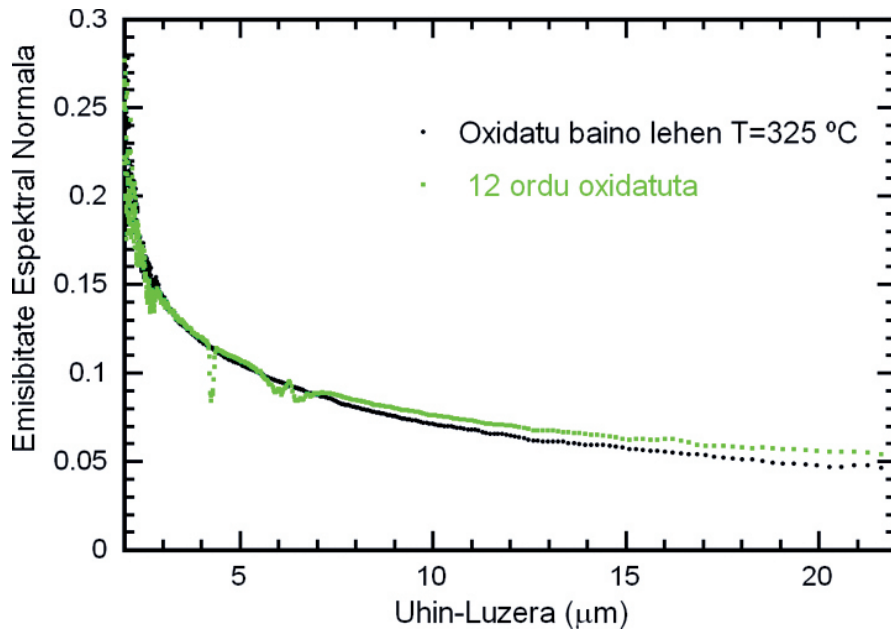
Temperaturaren funtzioan egindako emisibitatearen neurketak 4. irudian daude. Han ikus daitekeen uhin-luzera handietako emisibitatearen balioa 325°C-an 3. irudian agertzen den balioaren erdia da. Horren arrazoia hau da: 3. irudiko neurketak erradiazio normala aztertuz egin dira (gainazal-bektorearen eta erradiazioaren arteko angelua zero da) eta neurketa horietan gorputz beltzetik datorren erradiazio-kutsadura ere badago; 4. irudiko neurketak, ordea, gainazal bektorearen eta erradiazioaren arteko angelua 10°-koa izanik egin dira, kutsadura-erradiazioa ekiditeko. Azken konfigurazio hori erabiltzea emisibitate normala neurtzeko bermatuta dago, parametro hori metaletan angelu txikietarako konstante mantentzen baita. Oro har, Mg-%47Zn-%4Al aleazioan metal batean espero den portaera da emisibitatearena: uhin-luzera handitzen den heinean emisibitatearen balioa txikituz doa, eta temperatura handitzen den heinean, ordea, handituz [24].

Emisibitate espektral normaleko kurbak uhin-luzera guztietarako integratuz gero, temperatura bakoitzerako emisibitate normal totala kalkulatu daiteke. Emaitza horiek 5. irudian agertzen dira. Lortutako emaitza esperimentala adierazten dute puntu gorriek, eta lerro beltzak emaitzak doitzen ditu. Lerro zuzen batez doitu daitezke puntuak eta hori da, hain zuzen ere, metalen kasuan espero den $\varepsilon_{N,T}$ -n temperaturarekiko bilakaera [25].



5. irudia. Aztertutako temperatura bakoitzerako emisibitate normal totala, $\varepsilon_{N,T}$.

Amaitzeko, aleazioaren oxidagarritasuna eta haren efektuak aztertzeko, lagin-ganbera zabaldu eta giro-atmosferan utzi zen lagina 12 orduz, beste neurketa bat egin aurretik. Lortutako $\varepsilon_{N,\lambda}$ -ren emaitzak 6. irudian agertzen dira. Grafiko horretan ikus daitekeenez, uhin-luzera handietarako handitzen da emisibitatea. Hala ere, aldaketa horiek ez dira esanguratsuak. Gainera, oxidazioak emisibitatean duen eragina uhin-luzera txikietan agertzen da eta, oro har, oxidoek metalek baino emisibitate handiagoa dutenez, emisibitatearen handitzea ikusi beharko litzateke uhin-luzera motzetarako. Horrela ez denez, oxidorik ez dela sortzen ondoriozta daiteke. Bestalde, 12 orduz lagina oxidatzen egon deneko emisibitatearen kurban uhin-luzera txikietarako jaitsiera zorrotzak behatzen dira. Jaitsiera zorrotz horiek aireak xurgatutako erradiazioari dagozkio, aireko CO₂-ak (~4, 2 μ m) eta H₂O-ak xurgatutakoa (~5-7 μ m), alegia.



6. irudia. Emisibitate espektral normala 325°C-ko temperaturan 12 orduz giro-atmosferan egon aurretik (puntu beltzak) eta ondoren (puntu berdeak).

6. ONDORIOAK

Eguzki-energia metatzeko sistemetan erabiltzeko hautagai izan zitekeen aleazio hirukoitz eutektikoa aztertutakoan, baieztatu da aleazioak solido/li-kido trantsizioa 345°C-an duela, energia-metatzeko sistema horien teknolo-

gia optimizatzeko behar den bera. Solido/solido trantsiziorik ez dauka konposatu honek zoritxarrez; baldin balu efizientzia handituko luke.

Bestalde, materialaren emisibitate espektral normala zuzenean neuritutakoan, laneko tenperaturetan eta egoera solidoan, eta berebat emisibitate normal totala kalkulaturakoan, egiaztatu da emisibitate normal totalak tenperaturarekiko bilakaera lineala daukala. Horri esker, erradiazioaren bizko bero-galerak era egokian kalkulatu ahal izango dira.

Gainera, aleazioaren oxidazioa aztertutakoan, honako hau egiaztatu da: giro-atmosferan 12 orduz egonez ez da inolako oxidaziorik behatzen. Azken hori materialaren egonkortasun onaren seinale da eta, beraz, material hau hainbat aplikazio teknologikotarako egokia izan daiteke.

7. ESKER ONAK

Lan hau CIC energiGUNE laborategiei esker egin ahal izan da. Telmo Echánizek Eusko Jaurlaritzari eskerrak eman nahi dizkio jaso duen doktore aurreko diru-laguntzagatik.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] C.E. KENNEDY, Review of mid-to-high-temperature solar selective absorber materials. 2002. NREL/TP-520-31267.
- [2] C. G. GRANQVIST. 2007. *Solar Cells* **91**, 1529-1598.
- [3] N. SELVAKUMAR, H. C. BARSHILIA. 2012. *Solar Energy Materials & Solar Cells* **98**, 1-23.
- [4] F. CAO, K. MCENANEY, G. CHEN, Z. REN. 2014. *Energy Environmental Science* **7**, 1615-1627.
- [5] A. J. SIEVERS. 1979. *Solar Energy Conversion: Solid State Physics Aspects*, B. O. Seraphin (Ed.), Springer, Berlin, Heidelberg, p. 57.
- [6] C. M. LAMPERT. 1979. *Solar Energy Materials* **1**, 319.
- [7] I. DINCER, M. A. ROSEN. 2002. *Heating energy storage systems and applications*, Wiley, New York.
- [8] H. P. GARG. 2010. *Advances in solar energy technology*, Vol 1. D. Reider/Kluwer, Dordrecht.
- [9] B. ZALBA, J. M. MARIN, L. F. CABEZA, H. MEHLING. 2003. *Applied Thermal Engineering* **23**, 251-283.
- [10] M. M. KENISARIN. 2010. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **14**, 955-970.
- [11] M. LIU, W. SAMAN, F. BRUNO. 2012. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **16**, 2118-2132.

- [12] A. GIL, M. MEDRANO, I. MARTORELL, A. LÁZARO, P. DOLADO, B. ZALBA, L. F. CABEZA. 2010. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **14**, 31-55.
- [13] ‘Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres’ (E903-12), ASTM standard, Technical report.
- [14] T. ECHÁNIZ, I. SETIÉN-FERNÁNDEZ, R. B. PÉREZ-SÁEZ, C. PRIETO, R. ESCOBAR GALINDO, M. J. TELLO. 2015. *Solar Energy Materials & Solar Cells* **140**, 249-252.
- [15] E. RISUEÑO, A. FAIK, J. RODRÍGUEZ-ASEGUINOLAZA, P. BLANCO-RODRÍGUEZ, A. GIL, M. TELLO, B. DÁGUANNO. 2015. *Energy Procedia* **69**, 1006-1013.
- [16] L. DEL CAMPO, R.B. PÉREZ-SÁEZ, X. ESQUISABEL, I. FERNÁNDEZ, M. J. TELLO. 2006. *Review on Scientific Instruments* **77**, 113111.
- [17] A. SHARMA, V. V. TYAGI, C. R. CHEN, D. BUDDHI. 2009. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **13**, 318-45.
- [18] F. AGYENUM, N. HEWITT, P. EAMES, M. SMYTH. 2010. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **14**, 615-28.
- [19] P. BLANCO-RODRÍGUEZ, J. RODRÍGUEZ-ASEGUINOLAZA, E. RISUEÑO, M. J. TELLO. 2014. *Energy* **72**, 414-420.
- [20] D. LAING, T. BAUER, N. BREIDENBACH, B. HACHMANN, M. JOHNSON. 2013. *Applied Energy* **109**, 497-504.
- [21] V. ZIPF, A. NEUHAEUSER, D. WILLERT, P. NITZ, S. GSCHWANDER, W. PLATZER. 2013. *Applied Energy* **109**, 462-469.
- [22] T. ECHÁNIZ, R. B. PÉREZ-SÁEZ, E. RISUEÑO, L. GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, A. FAIK, J. RODRÍGUEZ-ASEGUINOLAZA, P. BLANCO-RODRÍGUEZ, S. DOPPIU, M. TELLO. 2016. *Journal of Alloys and Compounds* **684**, 62-67.
- [23] L. DEL CAMPO, R.B. PÉREZ-SÁEZ, M. J. TELLO, X. ESQUISABEL, I. FERNÁNDEZ. 2006. *International Journal of Thermophysics* **27**, 1160-1172.
- [24] L. DEL CAMPO, R. B. PÉREZ-SÁEZ, M. J. TELLO. 2008. *Corrosion Science* **50**, 194-199.
- [25] E. ASCHKINASS. 1905. *Annalen der Physik* **17(5)**, 960-976.