



IKER  
GAZTE  
NAZIOARTEKO  
IKERKETA EUSKARAZ

## IV. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2021eko ekainaren 9, 10 eta 11a  
Gasteiz, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:  
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

### INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Aluminioaren emisibitate neurketa  
zehatzak termografia  
infragorriarako**

*Mireia Sainz Menchón,  
Iñigo González de Arrieta,  
Telmo Echániz eta Gabriel A. López*

115-121 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iv.03.14>



## Aluminioaren emisibitate neurketa zehatzak termografia infragorriarako

Sainz-Menchón, M.; González de Arrieta, I.<sup>1,2</sup>; Echániz, T.<sup>3</sup> eta López, G.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fisika Saila. UPV/EHU. Sarriena auzoa z/g, 48940 Leioa.

<sup>2</sup> CNRS, CEMHTI UPR3079, Univ. Orléans, F-45071 Orléans, Frantzia.

<sup>3</sup> Matematika Aplikatua Saila. UPV/EHU. Torres Quevedo Ingeniariaren Plaza 1, 48013, Bilbo.

msainz015@ikasle.ehu.eus

### Laburpena

Aluminioaren propietate optikoen inguruko ezagutza garatzea beharrezkoa da termografia eta pirometria teknike-tan, zeinak aluminioaren ekoizpena eta saiakuntzak optimizatzeko funtsezkoak diren. Hori dela eta, aluminioaren emisibitatearen neurketa direkzionalak egin dira espektro infragorrian, hainbat temperaturatarako. Metalen erradiazio teoriarekin bateragarriak diren emaitzak lortu eta literaturan aurki daitezkeen datuekin alderatu dira. Parekatze horretan ageri diren ezberdintasunak azaltzeko, aztertutako laginaren zenbait parametro (zimurtasuna edota oxido geruza, esaterako) kontuan hartzea beharrezkoa dela ondorioztatu da. Aurretiatzko ezaugarritze horren bitartez, neurketa zehatzagoak egiteko eta aluminioaren propietate optikoen inguruko informazioa osatzeko bidea zabaltzen da.

**Hitz gakoak:** aluminio, emisibitatea, termografia, erradiazio termikoa, termometria

### Abstract

*Knowledge about the optical properties of aluminium is critical for the development of thermography and pyrometry techniques, which are essential for optimizing aluminium production and testing. Therefore, directional measurements of aluminium emissivity have been made in the infrared range as a function of temperature. The obtained results, which are compatible with theoretical predictions for the emissivity of metals, have been compared with the data found in the literature. It was concluded that it is necessary to take into account certain parameters (such as roughness or oxide layer) of the sample analyzed to explain the differences in this comparison. This preliminary characterization paves the way for a more comprehensive and accurate dataset on the emissivity and optical properties of aluminium.*

**Keywords:** aluminium, emissivity, thermography, thermal radiation, thermometry

## 1. Sarrera eta motibazioa

Aluminioa gehien erabiltzen den metal arina da, batez ere aeronautika eta biomedikuntza arloetan. Bere kos-tu, arintasun eta erresistentzia mekanikoari esker, metal hau oso moldaeraza da hainbat aplikaziotarako. Hala ere, bere ekoizpenak elektrizitate kopuru izugarria erabiltzen du eta bere kostua gorabeheratsua da; beraz, egokia da ekoizpen-prozesuak optimizatzea eta indartzea. Helburu horiek lortzeko moduetako bat prozesu industrialen kontrol termikoa hobetzea da, temperaturaren menpe dauden aldagaiak tarte zorrotzagoan jarrita. Halaber, *in si-tu* analisi termikoak aluminiozko produktuak aplikazioetan monitorizatzeko aukera ematen du, bai temperaturen banaketa aztertzeko, bai egituraren akatsik ote dagoen aztertzeko. Aplikazio horiek guztietarako erabil daitezkeen teknika ez-suntsitzaileak dira pirometria eta termografia, non materialen tenperatura jakiteko igorritako erradiazioa neurtzen den (Usamentiaga *et al.*, 2014).

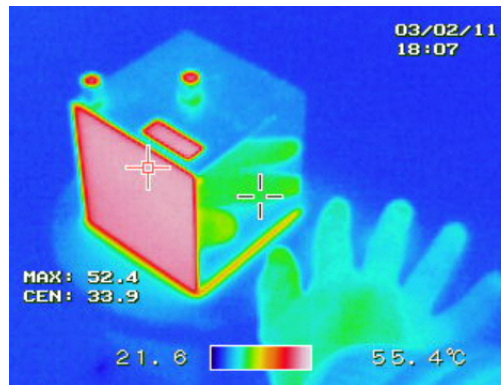
Aplikazio horretan tenperatura-neurketa fidagarriak eta moldakorrek edukitzeko parametrerik garrantzitsuena emisibitatea da. Emisibitatea propietate termofisiko bat da,  $[0,1]$  zuzen errearen tartean definitua, gorputz baten igorpen termikoa zenbatzen duena. Gehien igortzen duen gorputzari gorputz beltza deritza, eta bere erradiantzia (Planck-en legeak aurrerandakoa) erabiltzen da emisibitatea definitzeko zatidura bezala (Howell *et al.*, 2010):

$$\varepsilon(\lambda, \theta, T) = \frac{L(\lambda, \theta, T)}{L_{bb}(\lambda, T)}, \quad (1)$$

non  $\varepsilon$  emisibitatea den,  $L$  gorputzaren erradiantzia espektrala ( $\text{W m}^{-3} \text{sr}^{-1}$ ),  $L_{bb}$  gorputz beltzaren erradiantzia espektrala (hau da, Planck-en legea),  $\lambda$  uhin-luzera,  $\theta$  gainazalarekiko angelu polarra eta  $T$  temperatura.

Argi geratzen da definizioan emisibitatea uhin-luzera, temperatura eta angeluarekin alda daitezkeela. Gainera, aldaketa nabarmenak ikus daitezke gainazalen parametroak ere aldatzen badira (oxido geruzak eta zimurtasuna, batik bat). Hau garrantzitsua da; izan ere, emisibitate ezberdineko azalerak dituzten industria-inguruneetan, beharrezkoa da horiek ezagutzea temperatura zehaztasunez neurtu ahal izateko. 1. irudian argi ikusten da nolakoak diren temperatura-neurketen erroreak emisibitatearen balio desberdinak kontuan hartzen ez badira. Izan ere, termografia erabiltzeko erronka nabarmenetako bat emisibitatearen balio zehatzak eta fidagarriak edukitzea da (Apiñaniz *et al.*, 2014). Arazo honi aurre egiteko, emisibitate altuko estaldurak erabiltzen dira askotan, baina konponketa hori ezin da kasu guztietan erabili. Horregatik, industria metalurgikoaren beharrak erantzuteko diseinatu eta eraiki zen EHUz zehaztasun handiko emisometro infragorri bat (Echániz *et al.*, 2018; González de Arrieta *et al.*, 2020).

**1. Irudia: Leslie's cube: temperatura homogeneoa duen kuboaren argazki termografikoan temperatura-balio desberdinak agertzen dira, kamerak kubo osoak emisibitate berbera duela suposatzen baitu. Alde metalikoeak (urdinez) margotutako zatiek (gorriz) baino askoz gutxiago igortzen dute. Gainera gainazal metalikoeak inguruko gorputz beroek igorritako erradiazioa gehiago islatzen dute. Irudia: Pieter Kuiper (jabari publikoan).**



Termografia oso hedatuta dago aluminioz, bai aplikazioetan bai prozesaketan (Imatz *et al.*, 2005; Haugh, 1988). Termografia erabilgarria da aluminioaren industrian eta aluminio likido eta solidoaren emisibitatea parametro garrantzitsua da horretarako (Haugh, 1988; Leitner *et al.*, 2017). Gainera, aluminioaren emisibitatearen ezjakintasuna arazo handi bat da beste propietate termofisikoak neurtzerakoan, material honen kudeaketa termikoa zailtzen baita (Leitner *et al.*, 2017). Temperatura metodo pirometrikoen bidez neurtzeko orduan, bi teknika mota daude: espektralak eta multiespektralak, instrumentuak neur ditzakeen uhin-luzeren arabera. Zoritxarrez, aluminioaren emisibitate baxuak intentsitate ahuleko seinaleak sortzen ditu sentoreetan. Hortaz, termografiaren zehaztasuna hobetzeko uhin-luzera eta temperaturaren menpeko eredu matematiko bat erabiltzen da erradiantzia neurketak temperatura bihurtzeko, emisibitate uhin-luzera bakarrean neurtu beharrean (Usamentiaga *et al.*, 2014; Wen eta Mudawar, 2005, 2006). Eredu horiek balioztatzeke, beraz, beharrezkoa da datu zehatzak izatea eta material horren emisibitatearen menpekotasunak ondo ezagutzea.

## 2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Aluminioaren emisibitate datuak hainbat erreferentzian aurki daitezke (Ujihara, 1972; Yilbas *et al.*, 1991; Wen eta Mudawar, 2005, 2006; Zhang *et al.*, 2017, 2018), baina sakabanatze handia dago haien artean eta, beste metalekin erkatuz, ez dago azterketa sakon asko (Howell *et al.*, 2010). Metal hain hedatua denez, egoera hau kontraesan handia da. Arazo horren arrazoietakoa bat aluminioaren urtze-puntu baxua da ( $660 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Honek neurtzea esperimentalak zailtzen ditu, aluminio solidoaren aplikazioekin bateragarria den temperatura tartean erradiazio termikoaren seinale indartsurik ez baitago. Hortaz, ikerketa honek bi helburu nagusi ditu. Lehenik, aluminio puru

eta leunduaren emisibitatea zehaztasunez neurtzea. Ondoren, bibliografian aurkitzen diren datuekin konparatzea, desadostasunak azaltzea eta emisibitatearen menpekotasunak adieraztea.

### 3. Ikerketaren muina

#### 3.1. Materialak eta metodoak

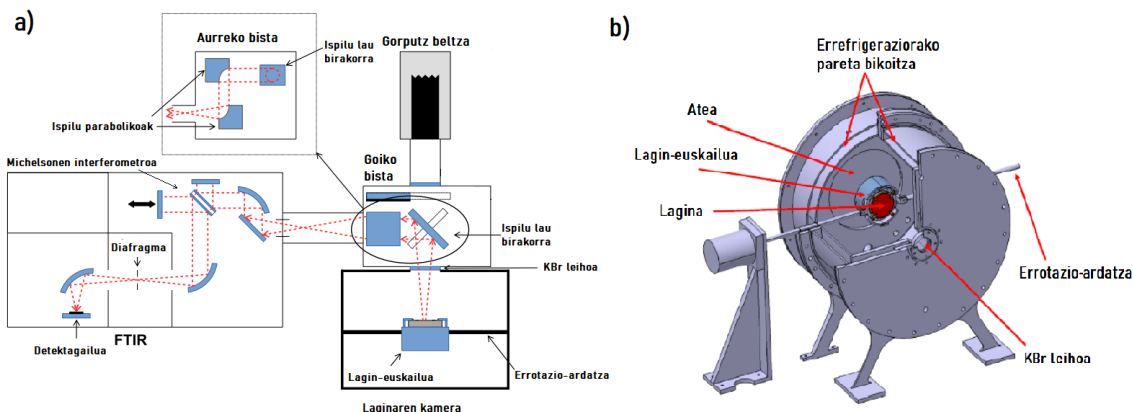
Lan honetan 50 mm x 50 mm-ko aluminio lagin karratua erabili da, 3 mm-ko lodiera eta %99.999 purutasuna duena. Laginean Fe 2 ppm, Si 2 ppm eta Mg 1 ppm-ko ezpurutasunak baino ez aurki daitezke. Laginaren tenperatura monotorizatzen zentrotik 5 mm-ra K motako bi termopare kokatu dira. Termopareak egokitzeko 0.5 mm-ko diametroan lau zulo egin dira laginaren gainazalean, bina termopare bakoitzeko. Termopareak osatzen duten bi hariak aipaturiko zuloetan sartuz, sentsorearen eta laginaren arteko kontaktu mekanikoa bermatzen da. Laginaren zimurtasuna ezaugarritzeko, zimurtasun-neurgailu mekaniko bat erabili da, zimurtasunaren profila ulertzeko parametro hauek ematen dituena:  $R_a$ , batezbesteko balioa;  $R_q$ , batezbesteko balio koadratikoa;  $R_z$ , muturren batezbesteko balioa; eta  $RSm$ , profilaren elementuen arteko batezbesteko tartea. Laginaren ezaugarriak 1. taulan aurkitzen dira.

1. Taula: Laginaren ezaugarriak. Zimurtasunaren parametroak testuan azaltzen dira.

Purutasuna (% m/m)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_q$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$RSm$ ( $\mu\text{m}$ )
99.999	0.30	0.34	0.94	415

Emisibitatea neurtzeko EHUn garatutako HAIRL emisometroa (High Accuracy InfraRed, Leioa) erabili da. Tresna honek leku pribilegiatua du emisibitateari buruzko literatura zientifikoan, eta bi hamarkada inguruko ibilbidea du. Hala ere, duela gutxi handitu eta hobetu egin da, besteak beste, emisio txikiko materialetan (metal puruetan, adibidez) neurtzeko gaitasuna hobetzeko (González de Arrieta *et al.*, 2020). Emisometroaren irudi eskematikoa 2.a irudian erakusten da. Tresnak hiru zati nagusi ditu: Fourier-en transformatuaren infragorriko (FTIR) emisometroa, gorputz beltza eta laginaren ganbera, azken hori 2.b irudian erakusten dena.

2. Irudia: HAIRL emisometroa (a) eta huts-ganberaren eskema (b).



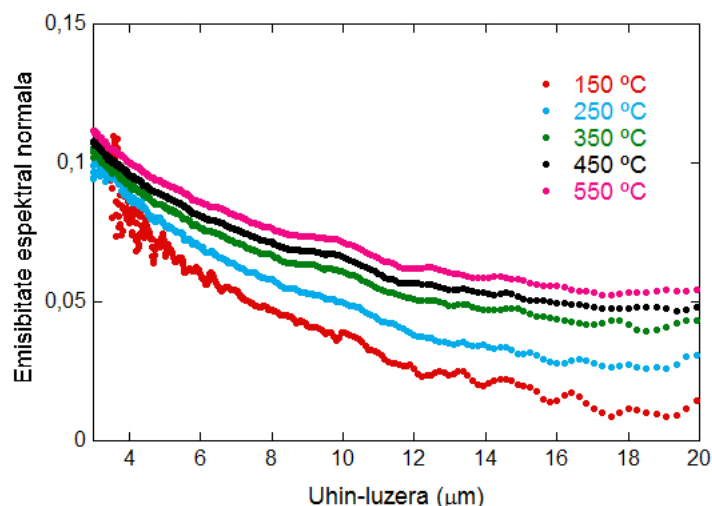
Laginaren ganbera altzairu herdoilgaitzez eginiko horma bikoitzeko egitura batek osatzen du. Lagin-euskailua ganbera barruan kokatzen da, eta errotazio-ardatz bati akoplaturik dago. Errotazio mugimenduari esker laginaren gainazalarekiko angelu polarra aldatu daiteke neurketa direkzionalak egin ahal izateko. Lagin-euskailuan egokituriko hari eroale batek lagina berotzea ahalbidetzen du, modu horretan lagina 1000 °C-raino berotu daiteke. Ganberaren tenperatura monitorizatu eta kontrolatzeko ganberaren barnealdeko paretan soldaturiko K motako bi termopare erabiltzen dira. Horretaz gain, errotaziozko huts-ponpa eta ponpa turbomolekularraren laguntzaz ganberaren barnean presioa egokitzen da,  $10^{-5}$  mbar-eko presioa lor daitekelarik. Sistemaren errefrigerazioa bermatzeko, ganberaren paretako bikoitzaren artean ura zirkularazten da, horren bitartez ganberaren kanpo egitura hozten baita. Ganberaren barnealdeko paretako absorbitate altuko (97%) margoz estalirik dago neurketetan eragin dezakeen erradiazio-erreflexioak ekiditzeko.

Aztertuko den erradiantzia aukeratzeko ispilu lau birakari bat erabiltzen da: ispilua  $90^\circ$  biratzeak laginetik datorren igorpena edo gorputz beltzetik datorrena bideratzeko aukera ematen du. Ispilu parabolikoetatik igaro eta gero, Michelsonen interferometroa erabiliz erradiazioa modulatu da, eta, ondoren, detektargailu batera heltzen da. 1. atalean azaldu den moduan, laginaren emisibitatea laginetik jasotako erradiantziaren eta gorputz beltzetik jasotako erradiantziaren arteko zatiketa izango da.

### 3.2. Emisibitate-neurketak

3. irudiak aluminioaren emisibitate espektrora erakusten ditu bost tenperaturan. Metalen kasuan ohikoa den bezala, emisibitate balio baxuak aurkitzen dira. Teoria elektromagnetikoak erakusten duen moduan, metalaren emisibitateak behera egiten du uhin-luzeraren balio handiagoetan, eta, gainera, tenperatura handituz emisibitateak balio altuagoak lortzen ditu (Howell *et al.*, 2010). Horretaz gain, aluminioak beste purutasun altuko eta gainazal leuneko metal gehienek bezala emisibitate balio baxuak erakusten ditu (Howell *et al.*, 2010; Setién-Fernández *et al.*, 2014). Zenbat eta laginaren tenperatura baxuagoa izan, orduan eta seinale zaratsuagoa jasotzen da, batez ere uhin luzera laburrenetarako. Hori dela eta,  $T = 150^\circ\text{C}$ -ko kurbaren uhin-luzera laburren datuak alde batera uztea erabaki da, ez baitzuten informazio garbirik eskaintzen.

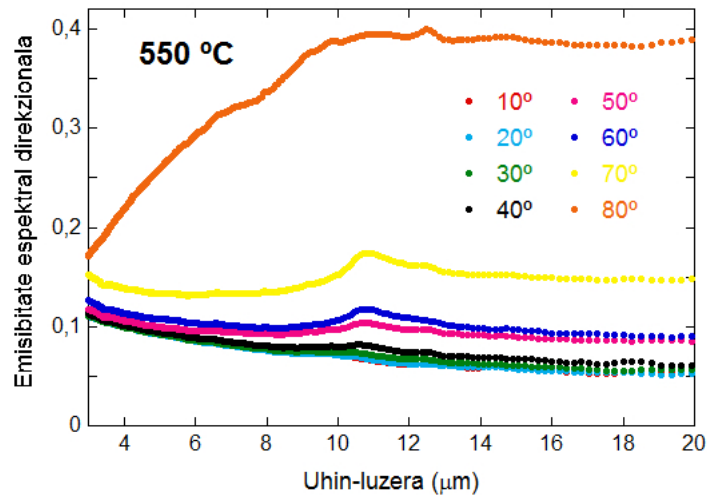
### 3. Irudia: Aluminioaren emisibitate espektrala bost tenperaturan, $\theta = 10^\circ$ izanik.



4. irudiak  $550^\circ\text{C}$ -tako aluminioaren emisibitate espektralaren kurbak erakusten ditu angelu polarraren hainbat baliotarako. Metalen kasuan, emisibitateak gora egiten du  $\theta$  angelua handitzearekin batera,  $\theta = 90^\circ$  angeluaren inguruan izan ezik, non balio maximo batera heldu ostean, emisibitatearen balioa zero bihurtzen den (Howell *et al.*, 2010). Metalen emisibitatea, izatez, nahiko konstante mantendu ohi da  $\theta = 50^\circ$  den arte, eta gero nabarmen handitzen da  $\theta$  handitzearekin batera. Joera horiek argi agertzen ditu 4. irudiko grafikoak:  $\theta = 10^\circ$  eta  $\theta = 40^\circ$  bitarteko emisibitate kurbek joera antzekoa erakusten dute,  $\theta = 50^\circ$ -tik gorako balioentzat, ordea, joera hori nabarmen aldatzen da eta emisibitatea balio altuagoetara iristen da.

Neurketa guztiak huts-ganberan egin arren, ezinezkoa da oxido geruza mehe bat ez agertzea. Geruza horien presentzia da bibliografian emandako balioen arteko desadostasunen faktore nagusietako bat. Kasu honetan, aluminio oxidoaren ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) presentzia nabarmentzen da  $\lambda = 11 \mu\text{m}$  inguruko balio direkzioaletan tontor baten agerpenagatik, konposatu honen bibrazio-modu normal bati dagokion uhin-luzera dela eta. Geruza hau aluminioak oxigenoarekin tenperatura altuetan duen erreaktibitate handiagatik sortzen da. Honek oxidazioaren progresioa inhibitzen duen geruza babesle baten haztea dakar. Oxido geruza hori ezaugarritzeko, aurretiko azterketak egin dira mikroskopia elektronikoan, energietan sakabanaturiko X-izpien espektroskopiarekin (SEM-EDS). Hauek materialaren sakonerako lehen mikran dagoen oxigeno kantitate txikia, baina detektagarria, dagoela adierazten dute. Geruzaren sakoneraren analisi sofistikatuagoa egiteko X-izpien bidezko fotoelektroien espektroskopiaren (XPS) azterketak proposatu dira, propietate optikoetan duen eragina kalkulatzeko beharrezkoa den datu bat baita.

4. Irudia: Aluminioaren emisibitate espektrala angelu polarraren hainbat baliotarako,  $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$  izanik.



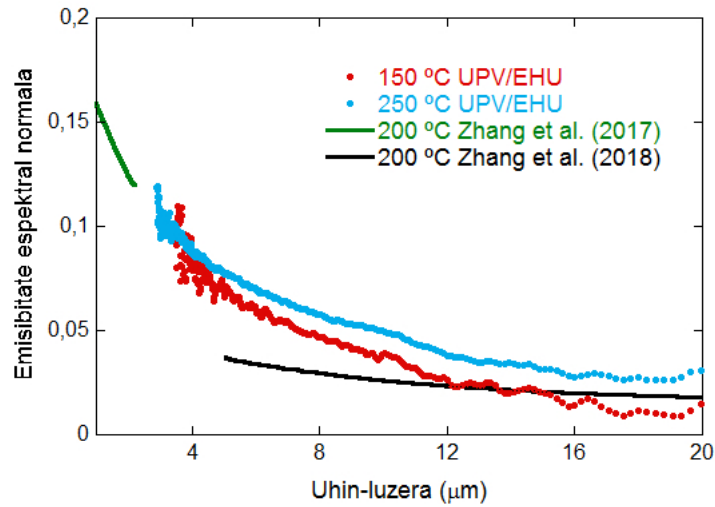
3.3. Datuen konparaketa

Emisibitate espektralaren emaitzak literaturan lortutako balioekin alderatzean, uhin-luzera bateko bi datu-multzo (Ujihara, 1972; Yilbas *et al.*, 1991) eta UPV/EHUn erabiltzen denaren antzeko tresna multiespektral batekin 100 eta 400  $^{\circ}\text{C}$  artean egindako neurketak (Zhang *et al.*, 2017, 2018) aurkitzen dira. 5. irudian, lan honetan 150 eta 250  $^{\circ}\text{C}$ -tan eta Zhangen lanetan 200  $^{\circ}\text{C}$ -tan lortutako emaitzak alderatzen dira. Zhangen neurketak 0.8-2.2  $\mu\text{m}$  eta 5-20  $\mu\text{m}$  tartean eginda daude. Bi neurketa-multzoetan erabilitako laginek %99.6ko purutasuna eta  $R_a = 0.08\text{ }\mu\text{m}$ -ko batzbesteko zimurtasuna dute. 5. irudira begira, ikusten da kasu guztietan emisibitatea gutxitu egiten dela uhin-luzera handitzearekin batera. Zhangen uhin-luzera laburren emaitzak (berdez) gure emaitzekin bat datoz. Zhangek uhin-luzera luzeetan (beltzez) dituen emisibitateak, ordea, antzeko portaera kualitatiboa izan arren, txikiagoak dira 5-12  $\mu\text{m}$  tartean. Emisio-balioetan dagoen alde horren arrazoi nagusia aluminio-laginen gainazaleko egoera ezberdinei zor zaio. UPV/EHUko laginarekin konparatuz, batzbesteko zimurtasuna txikiagoa dute eta zenbat eta zimurtasun txikiagoa izan, orduan eta gutxiago emitituko du laginak. Hala ere, garrantzitsua da aipatzea emisibitate oso txikiak zailtasunez neurtzen direla tarte espektral honetan; beraz, aluminioaren emisio-ahalmena azaltzeko ahalik eta datu gehien eduki behar dira.

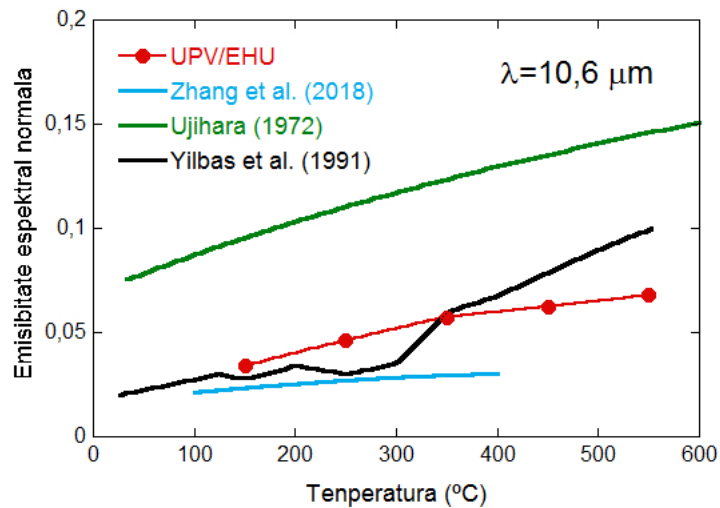
Beste konparaketa posible bat uhin-luzera bakarrek tekniken bidez lortutako datuekin eginikoa da (Ujihara, 1972; Yilbas *et al.*, 1991). 6. irudian, 10.6  $\mu\text{m}$ -tako emisibitate-datuak literaturan aurkitutakoekin alderatzen dira. Emaitza guztietan emisibitatea tenperaturarekin batera handitzen bada ere, emandako balioetan sakabanatze handia dago. Irudi honek argiago erakusten du emisibitate-neurketen problematika. Yilbasek eta laguntzaileek egindako neurketen kasuan, artikulu honetan aurkeztutako datuen antzeko joera dutela egiaztatzen da. Hala ere, emaitzen ziurgabetasun handia nabarmentzen da, aluminioak uhin-luzera luzeetan duen emisibitatearen balio txikia dela eta. Gainera, ezadostasun metodologikoak daude. Zhangek eta laguntzaileek metodo multiespektrala (FTIR) erabiltzen duten arren, Yilbasek eta laguntzaileek erreflektantzia-esperimentuetan oinarritutako zeharkako metodo bat erabiltzen dute; Ujiharak eta laguntzaileek, ordea, materialaren parametroetan oinarritutako eredu teoriko bat erabiltzen dute. Esanguratsua da nabarmentzea eredu teorikoak edozein esperimintutan neurtutakoak baino askoz balio handiagoak aurreratu dituela. Hori interesgarria da etorkizuneko azterketei begira, horietan garrantzi handiagoa emango baitzaio emaitzen ulermen teorikoari. Azkenik, aztertutako laginen gainazaleko egoerak emaitzak baldintzatzen ditu, zailtzarrik gabe; adibidez, Yilbasek eta laguntzaileek ez dute ematen erabilitako materialen zimurtasun-baliorik.

Laburbilduz, bibliografian dauden emaitzekin egindako alderaketaren arabera, argi dago emisibitate-neurketekin batera gainazalaren karakterizazio xehatua egin behar dela. Zimurtasunaren aldaketek, oxidazioak eta mekanizazio-prozesuak sortutako gainazaleko tentsioek neurtutako balioetan aldaketa handiak eragin ditzakete (Wen eta Mudawar, 2005; Howell *et al.*, 2010). Bestalde, Ujihararen eta laguntzaileen eredu teorikoa hobetzea etorkizunerako erronka da, emaitzak kuantitatiboki interpretatzeko eta sakabanatzea modurik onenean aztertzeko.

### 5. Irudia: Aluminioaren emisibitatea uhin-luzeraren arabera bibliografiaren datuekin konparatuz.



### 6. Irudia: Aluminioaren emisibitatea temperaturaren arabera bibliografiaren datarekin konparatuz.



## 4. Ondorioak

Purutasun altuko aluminio-lagin baten emisibitate espektral direkzionalaren azterketa egin da espektro infragorrian, 550 °C-ra arte. Neurketa horiek baliagarriak dira aluminiozko produktuak ekoizteko eta teknika termografikoak erabiliz ezaugarritzeko. Metal horren emisibitatearen inguruko datu gutxi daude bibliografian. Nahiz eta literaturan eskuragarri dauden datu eta eredu teorikoen adostasuna kualitatiboa izan, argi dago sakabanatze handia dagoela maila kuantitatiboan. Desadostasun horiek metalen emisibitate-neurketen zehaztasun gutxiegiaren ondorio izan daitezke, baita metodologiaren ondorio ere. Hala ere, faktore garrantzitsuenak zimurtasuna eta oxido geruza mehen presentzia dira. Faktore horiek guztiak etorkizuneko lan batean interpretatzeak aukera emango du aplikazio termografikoetan balio fidagarriak izateko.

## 5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Aluminiogintzan termografia garatzeko orduan, eredu matematiko fidagarriak eta erreproduzigarriak edukitzea da erronka nagusietako bat, neurketen zehaztasuna ziurtatzeko. Horregatik, lan hau etorkizunean osatuko da emisibitatean eragin handia duten parametroak kontuan hartuta, hala nola zimurtasuna edo oxido geruzak. Aldi berean, literaturan aurkitzen diren datuen azterketa sakona egingo da eta teoria elektromagnetikoa erabiliko da desadostasunak interpretatzeko.

## 6. Erreferentziak

- Apiñaniz, Estibaliz, Arantza Mendioroz, Alberto Oleaga, eta Agustín Salazar. 2014. Termografia infragorri aktiboa materialen azterketarako. *EKAIA. EHUko Zientzia eta Teknologia aldizkaria* 27.193–208.
- Echániz, Telmo, Iñigo González de Arrieta, Raquel Fuente, Irene Urcelay-Olabarria, Gabriel A. López, eta Josu M. Igartua. 2018. Eguzki-energia termikoa metatzeko materialetako emisibitate-esperimentuak. *EKAIA. EHUko Zientzia eta Teknologia aldizkaria* 34.199–210.
- González de Arrieta, Iñigo, Telmo Echániz, Raquel Fuente, Jose M. Campillo-Robles, Josu M. Igartua, eta Gabriel A. López. 2020. Updated measurement method and uncertainty budget for direct emissivity measurements at the University of the Basque Country. *Metrologia* 57.045002.
- Haugh, Michael J. 1988. Radiation thermometry in the aluminum industry. In *Theory and Practice of Radiation Thermometry*, ed. by David P. DeWitt eta Gene D. Nutter, chapter 17, 905–971. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Howell, John R., M. Pinar Mengüç, eta Robert Siegel. 2010. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Boca Raton: CRC Press, 5th edition.
- Imatz, Idurre Apraiz, Fernando José Alonso Orcajo, eta Borja Gambin. 2005. Diferentes técnicas END mediante termografía infrarroja. Aplicaciones en la industria aeroespacial. *DYNA* 80.35–38.
- Leitner, Matthias, Thomas Leitner, Alexander Schmon, Kirmanj Aziz, eta Gernot Pottlacher. 2017. Thermophysical properties of liquid aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions A* 48.3036–3045.
- Setién-Fernández, Iñigo, Telmo Echániz, Luis González-Fernández, Raúl B. Pérez-Sáez, eta Manuel J. Tello. 2014. Spectral emissivity of copper and nickel in the mid-infrared range between 250 and 900 °C. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 71.549–554.
- Ujihara, Kikuo. 1972. Reflectivity of metals at high temperatures. *Journal of Applied Physics* 43.2376.
- Usamentiaga, Rubén, Pablo Venegas, Jon Guerediaga, Laura Vega, Julio Molleda, eta Francisco G. Bulnes. 2014. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors* 14.12305–12348.
- Wen, Chang-Da, eta Issam Mudawar. 2005. Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48.1316–1329.
- , eta —. 2006. Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49.4279–4289.
- Yilbas, Bekir Sami, Kenan Danisman, eta Yilbas Zahide. 1991. Measurement of temperature-dependent reflectivity of Cu and Al in the range 30-1000 °C. *Measurement of Science and Technology* 2.668–674.
- Zhang, Kaihua, Kun Yu, Yufang Liu, eta Yuejin Zhao. 2017. Effect of surface oxidation on emissivity properties of pure aluminum in the near infrared region. *Materials Research Express* 4.086501.
- , Yuejin Zhao, Kun Yu, eta Yufang Liu. 2018. Development of experimental apparatus for precise emissivity determination based on the improved method compensating disturbances by background radiation. *Infrared Physics & Technology* 92.350–357.

## 7. Eskerrak eta oharrak

Lan honek Mireia Sainz Menchónen GrALaren zati bat osatuko du. Iñigo González de Arrietak eskerrak ematen dizkio Eusko Jaurlaritzari, *Ikertzaile Doktoreentzako Hobekuntzarako* doktoretza-ondoko laguntzagatik (POS-2020-1-0045). Euskal Herriko Unibertistateko Ikertaldeei Laguntza (GIU19/019) ere eskertzen da.