



Gradu amaierako lana
Fisikako gradua

Purutasun handiko aluminio laminatuaren eremu infragorriko emisibitatearen neurketa zehatzak

Egilea:
Mireia Sainz Menchón
Zuzendariak:
Gabriel A. López
Telmo Echániz Ariceta

© 2021, Mireia Sainz Menchón

Leioa, 2021eko ekainaren 17a

Gaien Aurkibidea

1	Sarrera	2
2	Oinarri teorikoa	4
2.1	Gorputz beltzaren erradiazio-ezaugarriak	4
2.2	Materialen erradiazio-ezaugarriak eta haien arteko erlazioa	5
2.3	Metalen erradiazio-ezaugarriak	7
2.4	Berreman efektua	8
3	Materialak eta metodoak	9
3.1	Tresneria	9
3.1.1	Laginaren ganbera	10
3.1.2	Temperatura altuko gorputz beltza	10
3.1.3	Sarrera optikoa	10
3.1.4	FTIR espektrometroa	11
3.2	Neurketa-metodoak	12
3.3	Erabilitako lagina eta horren karakterizazioa	13
4	Neurketen emaitzak	16
4.1	Norabidezko neurketak	16
4.2	Emisibitate total normala eta emisibitate total hemisferikoa	20
4.3	Emisibitate polarizatuaren azterketa	22
4.4	Datuen konparaketa	25
5	Ondorioak	28
6	Eskerrak	29

1 Sarrera

Aluminioa metal arina da, bero eta elektrizitatearen eroale ona eta oso moldaerraza. Horretaz gain, aluminioak korrosioaren aurkako erresistentzia ona du. Propietate horiek egiten dute aluminioa gehien erabiltzen den metal arina, batez ere aeronautikan eta industria automobilistikoan, baina aluminioa eta bere aleazioak oso garrantzitsuak dira ere eraikuntzan [1, 2]. Aipaturiko propietate fisikoen konbinaketak metal ezinhobea egiten du ere egunerokoan ezinbestekoak diren produktuen ekoizpenerako, horren adibide dira elikagaiak gordetzeko erabili ohi diren ontziak.

Horretaz gain, ikerketan erabiltzen diren gailu esperimentaletan, zein astrofisikan erabiltzen diren teleskopioetan erabili ohi diren ispiluak aluminioz eginik daude [3]. Horiek beirazko ispiluekin alderatuz hainbat abantaia eskaintzen dituzte. Beirazko ispiluak, esaterako, aluminiozkoak baino hauskorragoak dira, batez ere dimentsio handiko ispiluen kasuan [4]. Gainera, aluminiozko ispiluetan torlojuak sartzeko zuloak inplementatzea beirazko ispiluetan baino errazagoa da, eta horrek aluminiozko ispiluen muntaia errazten du.

Bestetik, kontuan harturik aluminioak askotariko erabilerak dituela, metal horren ekoizpen-prozesuak hobetzea eta indartzea ezinbestekoa suertatzen da. Hori egiteko moduetako bat prozesu industrialen kontrol termikoa hobetzea da. Termografia eta pirometria moduko teknika ez-suntsitzaileak aplikatu daitezke prozesu horietan. Teknika horiek materialek igorritako erradiazioa jaso eta produktuen tenperatura-banaketa aztertzeaz gain, produktuen egituran akatsik ote dagoen jakiteko ere erabili daitezke [5, 6]. Hori egiteko erabiltzen den propietate termofisikoa emisibitatea da zehazki. Aluminioaren kasuan, ordea, emisibitatearen inguruko datuak eskasak dira, eta horrek termografian erroreak izatea eragin dezake.

Nahiz eta literaturan tenperatura altuko aluminioaren emisibitatearen inguruko datu eta neurketak ageri diren [7–10], horiek ez dira ugariak; eta, bai erabilitako metodoetan, bai lorturiko emaitzetan, sakabanaketa dago. Gainera, beste metalekin alderatuz, ez dago aluminioaren propietate optikoen inguruko azterketa sakonik [11]. Tenperatura baxuetan eta giro tenperaturan eginiko neurketak topatu diren arren [12], lan honetan 150 °C gorako tenperaturetan lan egingo da.

Zenbait aplikazioetan emisibitate hemisferikoaren datuak erabiltzea komenigarriagoa da (emisibitate hemisferikoa 2. atalean aurkeztuko da), horiek tenperatura galerarekin zuzenean erlazionaturik baitaude. Emisibitate hemisferikoa lantzen duten ikerketak topatu badira ere [13–15], horiek kalorimetria esperimentuetan oinarritzen dira, eta orain dela 30-40 urte argitaratu ziren. Hortaz, teknika moderno baten bitartez datu horiek berretsi eta berritzea beharrezkoa suertatzen da. Horretaz gain, nahiz eta beste material batzuen kasuan emisibitate polarizatua ikertu den [16], ez dago horren inguruko daturik aluminioari dagokionez.

Metal hain hedatua denez, eta hainbeste aplikazio dituenez, egoera hau kontraesankorra da. Arazo horren arrazoietakoa bat aluminio solidoaren erradiazio termiko ahula izan daiteke. Aztertu ohi den tenperatura-tartean erradiazioak ez du seinale indartsurik sortzen, eta horrek neurketak zailtzen ditu.

Lan honen bitartez hurrengo helburuak betetzea bilatu da:

- Neurketa esperimentalak egiten, datuen tratamenduan eta datuen interpretazioan trebatzea.
- Purutasun handiko aluminio laminatu lagin baten emisibitatearen norabidezko neurketak egitea 150 - 550 °C tenperatura tartean. Neurketa horietan oinarrituz, norabide-emisibitate totala eta emisibitate total hemisferikoaren balioak lortzea.
- Erabilitako lagina produktuen ekoizpen-prozesuetan erabiltzen den aluminioaren lagin adierazgarria denez, aluminioa lantzen duten industria-aplikazioetarako erabilgarriak diren datuak lortzea.
- Aipaturiko laginaren emisibitate polarizatua aztertzea.
- Egindako neurketak literaturan aurkitu daitezkeen datuekin parekatzea eta literaturan ageri den aluminioaren emisibitatearen inguruko informazioa osatzea.
- Literaturako datuekin eginiko aldaraketan agertzen diren desadostasunak aztertzea eta azaltzea.

Memoriaren antolaketari dagokionez, lehenik, 2. atalean erradiazio termikoaren oinarriko kontzeptu teorikoak azalduko dira: gorputz beltzaren inguruan hitz egingo da 2.1 azpiatalean; ondoren, 2.2 azpiatalean materialen erradiazio-ezaugarriak aurkeztuko dira, eta, 2.3 azpiatalean, metalen erradiazio-propietateen inguruko informazioa emango da. Bestetik, Berremanen efektuaren inguruko zertzelada batzuk emango dira 2.4 azpiatalean, lan honetan garrantzia izango duen efektua baita.

3. atalean, alde batetik, erabilitako gailu esperimentalaren deskribapena emango da 3.1 azpiatalean, eta, bestetik, erabilitako neurketa-metodoak azalduko dira 3.2 azpiatalean. Gainera, erabilitako aluminio lagina deskribatu eta horren karakterizazio mikroestruturalaz hitz egingo da 3.3 azpiatalean.

Lorturiko emaitza esperimentalak 4. atalean aurkeztuko dira: 4.1 atalean aluminioaren norabide-emisibitate espektralaren balioak emango dira, horietan oinarrituz lorturiko norabide-emisibitate totalen eta emisibitate total hemisferikoen balioak 4.2 atalean emango dira eta emisibitate polarizatua 4.3 atalean aztertuko da. Literaturan aurkitu daitezkeen datuekin parekatuko dira lorturiko emaitzak, konparaketa 4.4 azpiatalean aurkitu daiteke. Azkenik, lan honen ondorioak 5. atalean bildu dira.

2 Oinarri teorikoa

Erradiazio termikoa beroa transmititzeko hiru moduetako bat da, beste biak kondukzioa eta konbekzioa izanik. Azken horiekin alderatuz, erradiazio termikoak duen berezitasuna garraiatzeko ingurune materialik behar ez izatea da, erradiazio elektromagnetikoak hutsetik hedatzeko ahalmena baitu. Hainbat prozesu natural eta artifizialen gakoa da erradiazio termikoa: ozeanoaren zeharreko energia garraioa determinatzen du, eguzki-panelen funtzionamedua bermatzen du eta fotosintesiaren oinarria da, esaterako. Erradiazioak dituen propietateen inguruko ikerketak prozesu naturalak ulertzeko atea zabaldu, eta aplikazio industrial zein esperimentalen diseinuak hobetzea ahalbidetzen du.

Atal honetan, lehenik, gorputz beltzaren erradiazioaren ezaugarriak azalduko dira. Hori eta gero, materialen erradiazio-ezaugarriak aurkeztuko dira, ondoren metalen erradiazio-propietateetan sakondu ahal izateko. Bestetik, Berreman efektuaren azalpena emango da, aluminioaren norabide-emisibitate espektralaren kurbetan ageri den maximo lokala azaltzen duena. Atal hau garatzeko [11] erreferentzia erabili da batez ere.

2.1 Gorputz beltzaren erradiazio-ezaugarriak

Gorputz beltza ezinbestean ezagutu behar den kontzeptua da erradiazio termikoaz aritzeko orduan. Gorputz hau jasotzen duen erradiazio guztia xurgatzeko gai da, horretaz gain, ahalik eta erradiazio gehien igortzen du.

Gainazal batek denbora unitateko, azalera unitateko, angelu solido unitateko eta $d\lambda$ uhin-luzera tartean igortzen duen energiari gainazalaren erradiantzia espektrala deritzo, $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ unitateetan adierazi ohi dena. Gorputz beltzaren kasuan, $L_{gb}(\lambda, T)$ izen-datuko da.

Erradiazio termikoaren funtsezko ekuazioa Plancken legea da, gorputz beltzaren erradiazioaren intentsitate espektrala deskribatzen duena:

$$L_{gb}(\lambda, T) = \frac{2C_1}{\lambda^5(\exp(C_2/\lambda T) - 1)} \quad (1)$$

non $C_1 = hc^2$ eta $C_2 = hc/k_B$ diren, h eta k_B Plancken eta Boltzmannen konstanteak izanik, hurrenez hurren. Konturatu aurreko ekuazioan igorpen-angeluaren (θ) independentea dela.

1. ekuazioa uhin-luzera guztietan integratuz hurrengo lortzen da:

$$L_{gb}(T) = \int_0^\infty L_{gb}(\lambda, T) d\lambda = \frac{2C_1\pi^4}{15C_2^4} T^4 = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \quad (2)$$

non $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ Stefan-Boltzmann konstantea den. Horko hori gorputz beltzaren erradiazioaren intentsitate totala da.

Azkenik, aurreko ekuazioa gainazal bati dagokion angelu solido osoan integratuz, gorputz beltzaren emisio ahalmen total hemisferikoa lortzen da, Stefan-Boltzmannen legeak

ematen duena:

$$E_{gb}(T) = \sigma T^4 \quad (3)$$

Gorputz beltzaren kontzeptuaren garrantzia materialen erradiazio-propietateen definizioan duen funtzioan datza, gorputz beltzaren erradiantzia erreferentziatzen erabiltzen baita materialen ezaugarriak definitzerako unean.

2.2 Materialen erradiazio-ezaugarriak eta haien arteko erlazioa

Behin gorputz beltza zer den argituta, atal honetan materialen erradiazioa aztertzeko balio duten ezaugarriak aurkeztuko dira: emisibitatea, absortibitatea, erreflektantzia eta transmitantzia. Propietate horien arteko erlazioak ere azalduko dira, baita erradiazioaren polarizazioarekin duten harremana ere.

Material baten emisibitatea igorpen-koefizientearen (ε) bitartez adierazten da, materialaren igorpen-ahalmena adierazten duena, tenperatura berean dagoen gorputz beltzaren igorpen-ahalmena erreferentziatzen izanik. Horren adierazpen orokorra **norabide-emisibitate espektralak** ematen du:

$$\varepsilon(\lambda, \theta, T) = \frac{L(\lambda, \theta, T)}{L_{gb}(\lambda, T)} \quad (4)$$

non θ gainazalaren normalarekiko angelu polarra den, λ igorpenaren uhin-luzera eta T tenperatura. Horrekin erlazonaturik **norabide-emisibitate totala** dago, gainazalak θ norabidean igorritako erradiantziaren eta gorputz beltzak igorritakoaren arteko erlazioa ematen duena:

$$\varepsilon_T(\theta, T) = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_0^\infty \varepsilon(\lambda, \theta, T) L_{gb}(\lambda, T) d\lambda \quad (5)$$

Bestetik, **emisibitate total hemisferikoak** gainazal baten igorpena eta tenperatura berean dagoen gorputz beltzak igorritakoaren arteko erlazioa ematen du:

$$\varepsilon_H(T) = \frac{\int_{\Omega} \int_{\lambda=0}^{\infty} [\varepsilon(\lambda, \theta, T) L_{gb}(\lambda, T) d\lambda] \cos\theta d\Omega}{\sigma T^4} \quad (6)$$

Absortibitatea (α) gorputzari eraso egiten dion erradiantzia (L_i) eta gorputzak xurgatzen duenaren (L_a) arteko erlazioa da. Xurgapen-koefizientearen bitartez adierazi daiteke:

$$\alpha(\lambda, \theta, T) = \frac{L_a(\lambda, \theta, T)}{L_i(\lambda, T)} \quad (7)$$

Kirchhoffen lehenengo legeak emisibitatea eta absortibitatearen arteko lotura ezartzen du oreka termodinamikoan:

$$\varepsilon(\lambda, \theta, T) = \alpha(\lambda, \theta, T) \quad (8)$$

Erreflektantzia (ρ) gorputzari eraso egiten dion erradiantzia eta honek islatzen duenaren (L_r) arteko erlazioa da, islatze-koefizientearen bidez adierazten dena:

$$\rho(\lambda, \theta, \theta_i, T) = \frac{L_r(\lambda, \theta, T)}{L_i(\lambda, \theta_i, T)} \quad (9)$$

Ekuzio horretan, θ_i erradiazio erasotzailearen norabidea definitzen duen angelua da. Azkenik, **transmitantziak** (τ) gorputzak jasotzen duen energia osoa eta gorputzaren gainazala zeharkatzen duen energiaren arteko erlazioa ezartzen du. Material opakoen kasuan, eta lan honetan onartuko den moduan, $\tau = 0$ da.

Propietate horien arteko lotura energiaren kontserbazioa aplikatuz lor daiteke. Gorputz erreal batek absorbitzen, transmititzen eta islatzen duen erradiazioak honako erlazio hau betetzen du:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (10)$$

Erlazio horri Kirchhoffen bigarren legea deritzo, eta Kirchhoffen lehenengo legearekin konbinatuz (8. ekuazioa) honako hau lortzen da:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (11)$$

Eta material opakoen kasuan:

$$\varepsilon + \rho = 1 \rightarrow \varepsilon = 1 - \rho \quad (12)$$

Propietate optikoak erradiazioaren polarizazioaren menpe ere egon daitezke. Hori Fresnelen ekuazioen bidez ikus daiteke, material orokor baten kasurako, hurrengo erreflexio-faktoreen adierazpenak lortzen dira [17]:

$$r_s \equiv r_{\perp} = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{\cos(\theta) - (N^2 - \sin^2(\theta))^{1/2}}{\cos(\theta) + (N^2 - \sin^2(\theta))^{1/2}} \quad (13)$$

$$r_p \equiv r_{\parallel} = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{N^2 \cos(\theta) - (N^2 - \sin^2(\theta))^{1/2}}{N^2 \cos(\theta) + (N^2 - \sin^2(\theta))^{1/2}} \quad (14)$$

Ekuzio horietan θ erradiazio erasotzailearen norabideak gainazalaren normalarekiko sortzen duen angelua da. Horiek, argiaren bi polarizazioen kasurako, erradiazio erasotzaile eta islatutako erradiazioaren eremu elektrikoaren (E_i eta E_r , hurrenez hurren) anplitudeen arteko erlazioa dira, non N errefrakzio-indize konplexua den:

$$N = n - ik \quad (15)$$

Polarizazio osagaien erreflektantziak hurrengo moduan lortu daitezke:

$$\rho_s = |r_s|^2 \quad (16)$$

$$\rho_p = |r_p|^2 \quad (17)$$

Polarizatu gabeko erradiazioarekin arituz gero, erreflektantzia bi osagaien batz bestekoa izango da:

$$\rho = \frac{\rho_s + \rho_p}{2} \quad (18)$$

Kontuan hartu 16 eta 17 ekuazioak eta Kirchhoffen legeak erabiliz emisibitate eta absorbitibitatearen osagai polarizatuak lor daitezkeela.

2.3 Metalen erradiazio-ezaugarriak

Lan honetan, purutasun handiko aluminioa da aztergaia. Hori dela eta, metalen erradiazio-propietateen azterketa azkarra egingo da. Metalek jasotzen duten erradiazioaren zati handi bat xurgatzen dute, horrek iraungitze-koefizientearen balioa handia izatea esan nahi du ($k \gg 1$).

Hori horrela izanik, metalen kasuan polarizazio osagaien hurrengo ekuazioak erabili daitezke [11]:

$$\rho_p(\theta) = \frac{(n\cos(\theta) - 1)^2 + (k\cos(\theta))^2}{(n\cos(\theta) + 1)^2 - (k\cos(\theta))^2} \quad (19)$$

$$\rho_s(\theta) = \frac{(n - \cos(\theta))^2 + k^2}{(n + \cos(\theta))^2 + k^2} \quad (20)$$

Emisibitatearen balioak 12. ekuazioa erabiliz lortu daitezke:

$$\varepsilon_p(\theta) = \frac{4n\cos(\theta)}{(n^2 + k^2)\cos^2(\theta) + 2n\cos(\theta) + 1} \quad (21)$$

$$\varepsilon_s(\theta) = \frac{4n\cos(\theta)}{\cos^2(\theta) + 2n\cos(\theta) + n^2 + k^2} \quad (22)$$

Emisioa polarizatu gabekoa dela onartuz, emisibitatea hurrengo moduan adierazi daitezke:

$$\varepsilon(\theta) = \frac{\varepsilon_p(\theta) + \varepsilon_s(\theta)}{2} \quad (23)$$

Orokorrean, gainazal leuneko eta purutasun handiko metalek emisibitate eta absorbitate baxua erakusten dute, eta, ondorioz, erreflektantzia altua. Metal horien emisibitateak gora egiten du gainazalaren normalarekiko angelua (θ) handitzearekin batera; $\theta = 90^\circ$ inguruan izan ezik, non maximo batera heldu ostean balioa zerorantz txikitzen den. Bestetik, eremu infragorrian, metalen emisibitate espektralaren balioa txikitzeko joera du igorpenaren uhin-luzera handitzearekin batera. Metalaren gainazalaren egoerari dagokionez, zimurtasunaren balioa erradiazioaren uhin-luzera baino txikiagoa bada, erradiazio-ezaugarriak teoriak auresandako joera izatea espero daiteke, batez ere propietate hemisferikoen kasuan. Norabide-propietateen kasuan, ordea, gainazalaren zimurtasunak eragin garrantzitsua izan dezake [11].

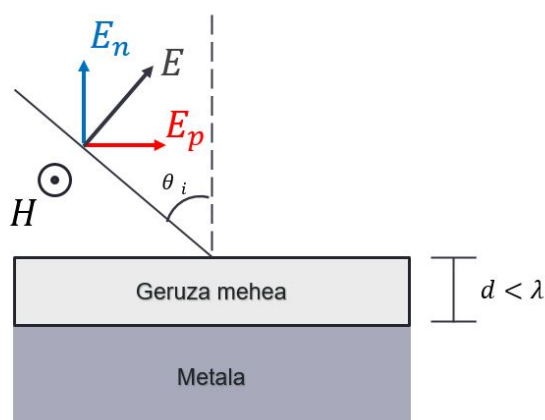
2.4 Berreman efektua

Geruza meheen erradiazio-ezaugarriak aztertzean, Berreman efektua izeneko fenomenoak aurki daitezke, D. W. Berremanek formulatu zuena 1963an [18]. Lan honetan lorturiko emaitzak azaltzeko funtsezkoa den efektua denez, laburki azalduko da hurrengo lerroetan.

Gainazal metaliko baten gainean ezarritako geruza mehe bat P polarizazioko erradiazioarekin zeharka ($\theta_i \neq 0$) erasotzen denean gertatzen da Berremanen efektua. Geruza mehearen errelektantziak minimo bat erakusten du luzetarako modu polar optikoaren maiztasunean (LO).

Funtzio dielektrikoak ($\epsilon(\omega)$) material batek eremu elektriko baten aurrean dielektriko ki nola erantzuten duen zehazten du: $\vec{D}(\omega) = \epsilon(\omega)\vec{E}(\omega)$. Funtzio hori errelektantziaren indize konplexuarekin erlazionatzen da ($N(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)}$), eta, hortaz, materialen erradiazio-propietateekin lotura du. Aipaturiko geruza mehea soilik hartzen bada kontuan, gainazalaren errelektantziak egitura bereziak erakusten ditu funtzio dielektrikoaren zero eta poloetarako [19], hau da, LO eta TO fonoi optikoen errelektantzia maiztasunetarako, hurrenez hurren. Geruza mehea gainazal metaliko baten gainean ezartzean, ordea, LO maiztasuneko errelektantzia indartu eta TO maiztasuneko errelektantzia ahuldu egiten dela ikusi zuen Berremanek. Esandako moduan, luzetarako fonoi optikoen errelektantzia funtzio dielektrikoa zero egiten duen maiztasunean gertatzen da, eta hori errelektantziaren minimo batekin loturik dago.

P polarizazioan erradiazioaren eremu elektrikoak gainazalarekiko normala den osagaia du (ikus 1. irudia), eta osagai normal horrek sortzen dituen gainazal-kargak dira LO maiztasunaren errelektantziaren eragile. Kristal infinituen kasuan, erradiazio elektromagnetikoa indargetu egiten denez, ez da aipaturiko errelektantzia gertatzen; igorritako erradiazioaren uhin-luzera baino meheagoak diren geruzetan, ordea, bai [19]. Konturatu erradiazioak eraso angelua (θ_i) handitzen den heinean, erradiazioaren eremu elektrikoaren gainazalarekiko normala den osagaia orduan eta handiagoa egiten dela. Hori Berreman efektua θ_i handitzearekin batera nabariagoa izatearen arrazoa da.



Irudia 1: Aztergai den egituraren eskema. Erradiazio P polarizatuaren eremu elektrikoaren osagaiak gainazalarekiko normala eta tangentiala diren osagaietan deskonposatu da.

Geruza mehea gainazal metaliko islatzaile perfektu baten gainean kokaturik badago,

Fresnelen ekuazioak moldatu daitezke egitura berria deskribatu dezaten [18]. Egitura horren errelektantziaren osagai polarizatuak honako hauek dira:

$$\rho_s(\lambda, \theta_i) = |r_s|^2 \approx 1 \quad (24)$$

$$\rho_p(\lambda, \theta_i) = |r_p|^2 \approx 1 - \frac{8\pi d}{\lambda} \operatorname{Im} \left(-\frac{1}{\varepsilon(\lambda)} \right) \frac{\sin^2 \theta_i}{\cos \theta_i} \quad (25)$$

non d geruzaren lodiera den eta $\operatorname{Im} \left(-\frac{1}{\varepsilon(\lambda)} \right)$ materialaren galera-funtzio dielektrikoa. LO erresonantzietan $\operatorname{Im} \left(-\frac{1}{\varepsilon(\lambda)} \right)$ funtzioa maximo batera iristen da [19], horrek errelektantzia P polarizatuak minimo bat izatea eragiten du, eta, hortaz, emisibitatea maximo batera iristen da.

Berreman efektuak oso geruza meheak detektatu eta karakterizatzeko bidea zabaltzen du, horren bidez nanometro gutxi lodi diren gainazalak detektatzera iritsi dira [20]. Efektua, hasiera batean, gainazal kristalinoekin aztertu bazen ere, gainazal amorfoetan ere detektatu da [19].

3 Materialak eta metodoak

Atal honetan, alde batetik, emisibitate neurketak egiteko erabilitako gailu esperimentalak eta lagina deskribatu eta haien ezaugarriak emango dira. Beste alde batetik, neurketak egiteko metodoa azalduko da.

3.1 Tresneria

Emisibitatea neurtzeko UPV/EHU garatutako HAIRL emisometroa (High Accuracy InfraRed, Leioa) erabili da. Tresnak bi hamarkada inguruko ibilbidea du eta duela gutxi handitu eta hobetu egin da, besteak beste, emisio txikiko materialetan (metal puruetan, adibidez) neurtzeko gaitasuna hobetzeko [21].

Emisometroaren irudi eskematikoa 2 irudian ikus daiteke. Tresnak lau zati nagusi ditu: Fourier-en transformatuaren infragorriko (FTIR) emisometroa, sarrera optikoa, tenperatura altuko gorputz beltza eta laginaren ganbera, azken hori 2. irudian erakusten da. Lau zati horiek T itxurako gailua osatzen dute.

Tresnaren diseinu eta hobekuntzei esker aztertu daitekeen erradiantziaren uhin-luzera tartea eta kontrolpean eduki ahal diren parametroen balio-tarteak 1. taulan ageri dira.

Taula 1: Emisometroaren parametroen balio-tarteak.

Parametroa	Tartea
Uhin-luzera (λ , μm)	1.43 - 25
Angelu polarra (θ , $^\circ$)	0 - 80
Tenperatura (T , K)	300 - 1273
Presioa (P , hPa)	$5 \cdot 10^{-5}$ - 10^3

3.1.1 Laginaren ganbera

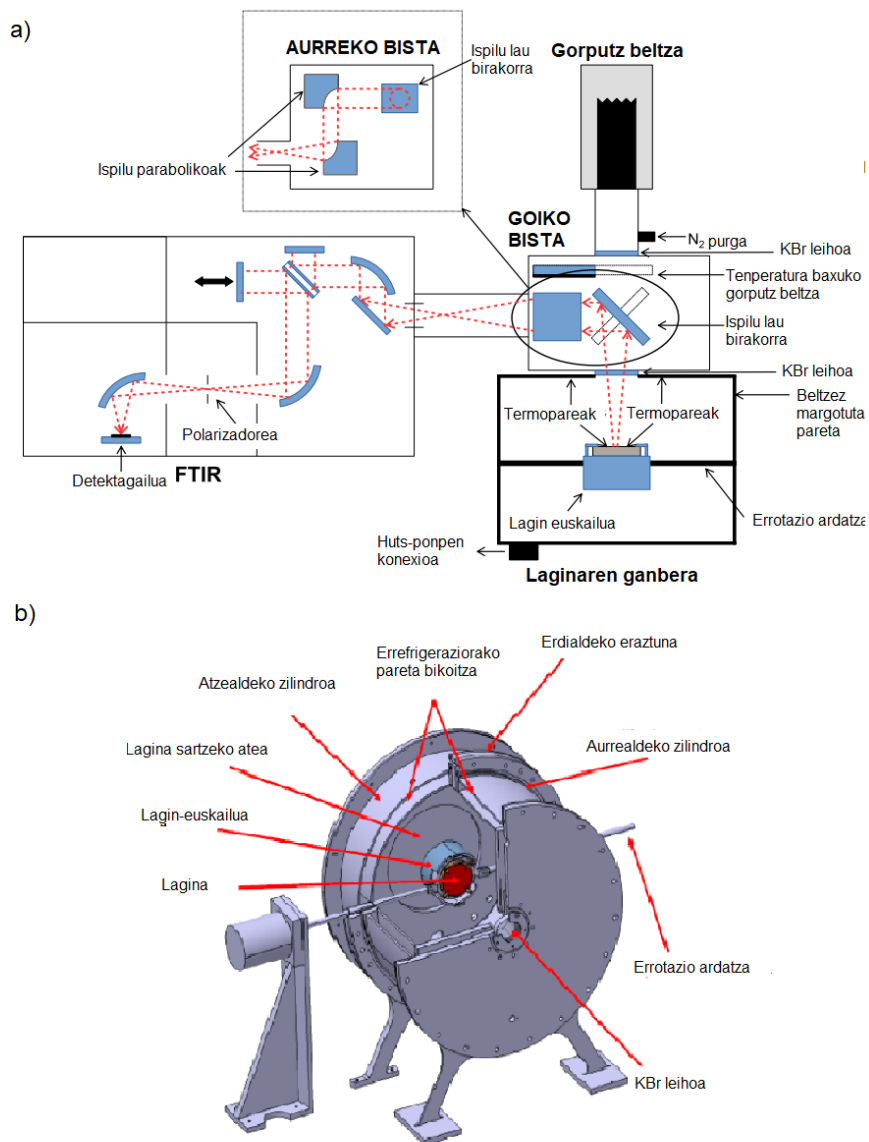
Laginaren ganbera altzairu herdoilgaitzez eginiko horma bikoitzeko egitura batek osatzen du. Lagin-euskailua ganbera barruan kokatzen da, eta errotazio-ardatz bati akoplaturik dago. Errotazio mugimenduari esker laginaren gainazalaren normalarekiko angelua (θ) aldatu daiteke norabidezko-neurketak egin ahal izateko. Lagin-euskailuan egokituriko hari eroale batek lagina erradiazioz berotzea ahalbidetzen du. Ganberaren tenperatura monitorizatu eta kontrolatzeko barnealdeko paretan soldaturiko K motako bi termopare erabiltzen dira. Gainera, errotaziozko huts-ponpa eta ponpa turbomolekularraren laguntzaz ganberaren barnean hutsa egokitzen da. Sistemaren erreferentzia bermatzeko, pareta bikoitzaren artean ura zirkularazten da, horren bitartez ganberaren kanpo egitura hozten baita. Ganberaren barnealdeko pareta absortibitate altuko (%97) Nextel 811-21 margo beltzez estalirik dago neurketetan eragin dezaketen erradiazio-erreflexioak ekiditzeko.

3.1.2 Tenperatura altuko gorputz beltza

Tenperatura altuko gorputz beltza emisio altuko gorputz beltz komertziala da (Isotek Pegasus R), gutxienez 0.995-ko emisibitatea izatea bermatua dago. Horren tenperatura PID baten bidez kontrolatu eta R motako termopare batekin neurtzen da.

3.1.3 Sarrera optikoa

Sarrera optikoa gorputz beltza eta laginaren ganbera FTIR espektrometroarekin konektatzen dituen elementua da. Aztertuko den erradiantzia FTIRra bideratzeko ispilu lau birakari bat erabiltzen da: ispilua 90° biratzeak laginetik datorren igorpena edo tenperatura altuko gorputz beltzetik datorrena bideratzeko aukera ematen du. Bi ispilu paraboliko ere erabiltzen dira erradiazioa FTIRra zuzentzeko. Horretaz gain, tenperatura baxuko gorputz beltz bat ere aurkitzen da sarrera optikoaren kuxaren barruan. Azken hori burdinezko disko bat da, Nextel 811-21 margo beltzez margoturik dagoena eta zeinaren tenperatura K motako termopare batekin neurtzen den.



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

3.1.4 FTIR espektrometroa

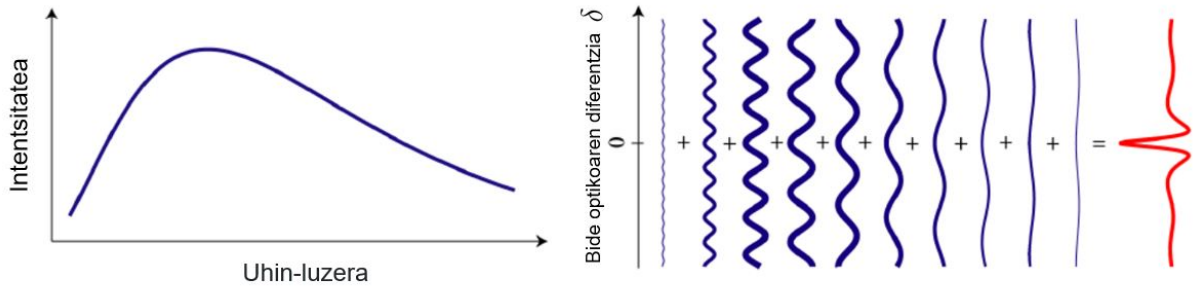
Erabiltzen den FTIR espektrometroa Bruker IFS 66v/S ereduakoa da. FTIR espektrometroa Michelsonen interferometroan oinarritzen da, eta horren bitartez aztertu nahi den erradiazioaren espektroak lortzen dira. Erradiazioa espektrometroan sartu eta kolimatu egiten da, ondoren, aipaturiko Michelsonen interferometroa iristeko.

Michelsonen interferometroan sartzen den erradiazioa intentsitate bereko bi sortetan banatzen da Ge/KBr izpi-zatitzaile bat erabiliz, erradiazioaren sorta bat finko dagoen ispilu batera iristen da, eta beste sorta mugikorra den ispilu batera. Bigarren ispilu hori d distantzia desplazatuz, bigarren erradiazio-sortaren bide optikoa $\delta = 2d$ distantzia aldatzen da lehenengo sortaren bide optikoarekin alderatuz.

Ispiluetan islatu ostean, erradiazioa izpi-zatitzailera itzuli eta birkonbinatu egiten da gainezarpren-printzipioa betez eta interferograma deituriko interferentzia-patroia eratuz

(ikus 3. irudia). $\delta = 0$ denean, gainezarmena konstruktiboa da, eta interferogramaren maximo zentralari dagokio. δ orduan eta handiagoa izan, seinalea ahuldu egiten da.

Horren ostean, erradiazioa ispilu paraboliko batzuen bidez DLaTGS detektagailura bideratzen da. Interferogramari Fourierren transformatua aplikatuz, erradiazioaren espektroa lortzen da.



Irudia 3: Ezkerrean erradiazioaren espektroa ikus daiteke, eskubian, espektro horri dagokion interferogramaren eraketa (*Arcoptix S.A.*, modifikatua).

Lan honetan aluminioaren erradiazioaren emisibitate polarizatua aztertu da, horretarako polarizadore lineal bat jarri da erradiazioaren bide optikoan (ikus 2. irudia). Polarizadorea bi posizioetan jarrita erradiazio polarizazio osagai paraleloan (P polarizazioa) eta perpendikularrean (S polarizazioa) banatu ahal izan da horiek aztertu ahal izateko.

3.2 Neurketa-metodoak

Detektagailuan jasotako seinalea eta emisibitatearen arteko erlazioa lortzeko *blacksur* metodoa erabili da [22], hurrengo lerroetan azalduko dena.

Ganberatik ateratzen den erradiazio espektrala hurrengo ekuazioaren bitartez adierazi daiteke, luginak igorritako erradiazioa eta luginaren inguruak igorri eta laginean islatu den erradiazioa kontuan hartzen dira:

$$L^* = \varepsilon L_l + \rho L_{ing} = \varepsilon L_l + (1 - \varepsilon) L_{ing} \quad (26)$$

non L^* ganberatik ateratzen den norabide-erradiazioa den, ε luginaren norabide-emisibitate espektrala, ρ luginaren norabide-erreflektantzia hemisferikoa, L_l luginaren tenperaturan dagoen gorputz beltzaren igorpena eta L_{ing} ganberaren tenperaturan dagoen gorputz beltzaren igorpena.

Detektagailuan jasotzen den seinalearen eta ganberatik ateratzen den erradiazioaren arteko erlazioa hurrengoa da:

$$S_l = RA_l F_{l-det} L^* + S_0 \quad (27)$$

non S_l luginaren ganberatik jasotako seinalea den, R FTIR-aren erantzun-funtzioa, A_l luginaren azalera, F_{l-det} konfigurazio-faktorea eta S_0 espektrometroaren hondoko seinalea.

R eta S_0 funtzioak ez dira temperaturaren menpeko, eta horien balioak lortzeko kalibrazioa egiten da. Kalibrazio horri esker interferometroa erabiliz lorturiko seinalea emisibitatearekin erlazionatzen da. Horretarako, bi temperaturako kalibrazio-metodoa erabiltzen da: temperatura desberdinetan dauden bi gorputz beltzen igorpena aztertzen da S_0 eta R funtzioen balioak jakiteko; eta, modu horretan, jasotako seinalearen eta emisibitatearen arteko erlazioa guztiz ezagutzeko. Helburu horrekin erabiltzen dira 3.1. atalean azaldu eta 2. irudian ageri diren temperatura altuko eta temperatura baxuko gorputz beltzak, gb_1 eta gb_2 izendatu direnak, hurrenez hurren. Gorputz beltz bakoitzaren kasuan 27. ekuazioa aplikatuz bi ezezaguneko ekuazio sistema lortzen da:

$$S_{gbi} = RA_{gbi}F_{gbi-det}L_{gbi}^* + S_0 \quad i = 1, 2 \quad (28)$$

Gailuaren diseinua dela eta, bi erradiantzia iturriak bide optiko berdinean kokaturik daudenez, $A_{gb1}F_{gb1-det} = A_{gb2}F_{gb2-det}$ onar daiteke. Era berean, laginaren eta erreferentziazko gorputz beltzen gainazalak berdinak izanik, eta horien konfigurazio faktoreak ere berdinak badira, hurrengo moldaketa egin daiteke: $R^* = RA_lF_{l-det} = RA_{gb1}F_{gb1-det}$. Behin R eta S_0 funtzioen balioak jakinda eta 26. eta 27. ekuazioak konbinatuz, emisibitatea jakiteko *blacksur* metodoak ematen duen ekuazioa lor daiteke:

$$\varepsilon = \frac{S_l - S_0 R^* L_g}{R^* (L_s - L_g)} \quad (29)$$

Ekuazio hori, ordea, azken urteetan modifikatua izan da beste neurketa-parametro batzuk kontuan hartu eta fidagarriagoa izateko [21]. Hori eginez lorturiko ekuazioa hurrengo hau da:

$$\varepsilon = \frac{\frac{(S_l/a - S_{gb1}) \cdot (\varepsilon_{gb1} L_{gb1} - \varepsilon_{gb2} L_{gb2})}{S_{gb1} - S_{gb2}} + \varepsilon_{gb1} L_{gb1} - L_g}{(L_s - L_g)} \quad (30)$$

non $a(\lambda)$ erantzun-funtzio anisotropikoa den. Horren jatorria laginaren eta gorputz beltzen konfigurazio-faktoreak berdinak ez izatean datza: $F_{l-det} = aF_{gb1-det}$, non a neurgarria den bide optikoen diferentzia-faktorea den. Azkenik, hurrengo definituz:

$$Q = \frac{S_s/a - S_{gb1}}{S_{gb1} - S_{gb2}} \quad (31)$$

seinale-neurketa guztiak funtzio bakarrean bildu eta 30. ekuazioa era sinpleagoan idatz daiteke:

$$\varepsilon = \frac{Q \cdot (\varepsilon_{gb1} L_{gb1} - \varepsilon_{gb2} L_{gb2}) + \varepsilon_{gb1} L_{gb1} - L_g}{(L_s - L_g)} \quad (32)$$

3.3 Erabilitako lagina eta horren karakterizazioa

Lan honetan GoodFellow-n erositako 50 mm x 50 mm-ko aluminio laminatu 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 gainazala leundua izan da aurretiaz. Aluminio laminatu lagina erabiltzea aukeratu da ekoizpen-prozesuetan erabili ohi den aluminio mota delako. Hots, industria-prozesuetan garatzen

diren aluminio produktuen lagin adierazgarria da.

Laginaren tenperatura monotorizatzeke 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. Termoparea osatzen duten bi hariak aipaturiko zuloetan sartuz, sentsoaren eta laginaren arteko kontaktu mekanikoa bermatzen da.

Laginaren zimurtasuna ezaugarritzeko, zimurtasun-neurgailu mekaniko bat erabili da, zimurtasunaren profila ulertzeko hurrengo parametroak ematen dituenak: R_a , zimurtasunaren batezbesteko aritmetikoa; R_q , zimurtasunaren batezbesteko balio koadratikoa; R_z , tontor eta haranen arteko batezbesteko distantzia; eta RSm, profilaren elementuen arteko batezbesteko tartea. Laginaren ezaugarri horiek 2. taulan bildu dira.

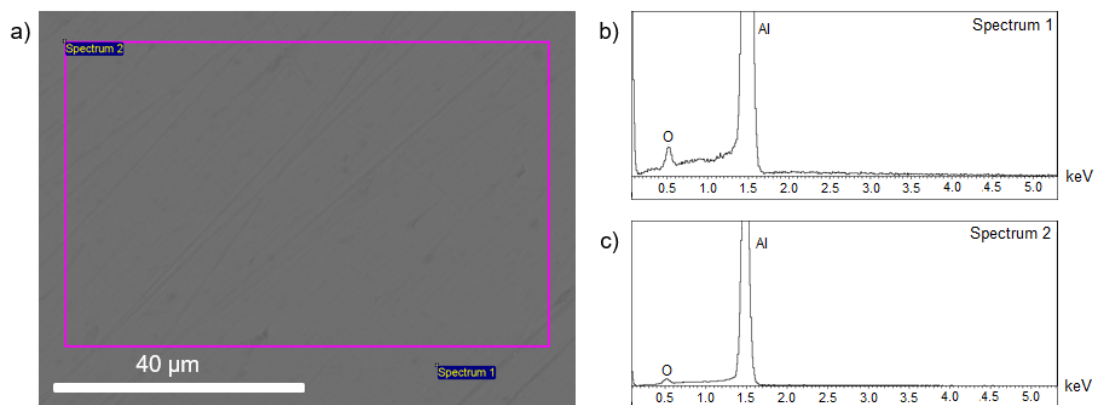
Taula 2: Laginaren purutasuna eta zimurtasunaren parametroen balioak

Purutasuna (%m)	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)	RSm (μm)
99.999	0.30	0.34	0.94	415

Horrekin batera, laginaren karakterizazio mikroestruturala egin da SEM-EDS eta XPS tekniken bidez. **SEM**aren bitartez (*Scanning Electron Microscope*) lagin baten topografia azter daiteke horren gainazaleko irudiak lortuz eskala nanometriko zein mikrometrikoan [23]. Eremu elektriko baten bidez azeleraturiko elektroik sorta bat erabiliz aztertu nahi den laginaren gainazala zeharkatzen da. Elektroik horiek laginaren gainazalaren atomoekin elkarrekintza ezberdinak izan ditzakete. Alde batetik, elektroik sekundarioak sortzen dira, laginaren topografiaren inguruko informazioa ematen dutenak, horiek detektagailu batean jaso eta irudi topografikoak lortzen dira. Bestetik, laginaren azterketa konposizionala elektroik erretrodispertsatuak (BSE, *backscattered electrons*) erabiliz egin daiteke. Elektroik horiek laginaren atomoen nukleoekin interakzionatu, eta, ondoren, detektagailuan jasotzen dira. Interakzio nuklear horri esker lagina osatzen duten elementuen inguruko informazio erlatiboa jasotzen da, era espektralean adierazi daitekeena (ikus 4b eta 4c irudiak). Atomoen pisuaren arabera kontrastea sortzen da; atal argiagoak atomo pisutsuei dagozkie, atal ilunagoak, berriz, atomo arinei. Elektroik sorta erasotzaileak materialarekin duen elkarrekintzaren ondorioz fotoiak ere sor daitezke. Materialaren elementuen arabera izango da fotoi horien kopuru eta energia, eta **EDS** (*Energy-dispersive X-ray spectroscopy*) bidez informazio hori aztertu daiteke, laginaren konposizio elementala jakiteko.

SEM bidez eginiko azterketaren arabera, erabilitako aluminio laginaren gainazalean ez da kontaminaziorik ez egitura arrarorik ageri: lagina leun eta garbi dago, ez dago kontrasterik (ikus 4a irudia). EDS bidezko azterketan, ordea, oxido geruza mehe bati dagokion oxigenoa topatu da (ikus 4b eta 4c irudiak). Geruza horren jatorria aluminioak oxigenoarekin duen erreaktibitate handian datza. Horrek oxidazioaren progresioa inhibitzen duen geruza babesle baten sorketa eragiten du, eta geruza horren presentzia da EDS bidez detektatu dena.

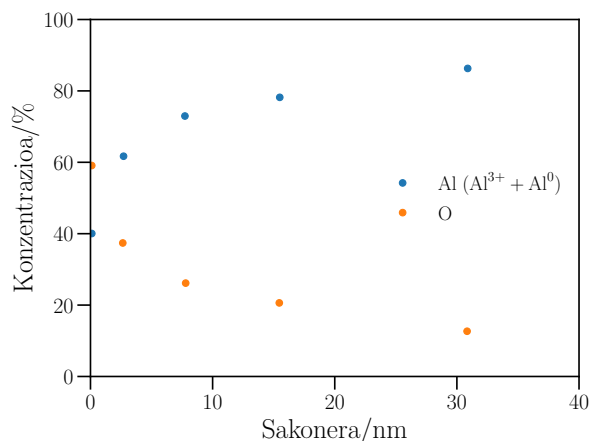
Azkenik, EDS bidez detekaturiko oxido geruza karakterizatzeko **XPS** (*X-ray Photoe-*



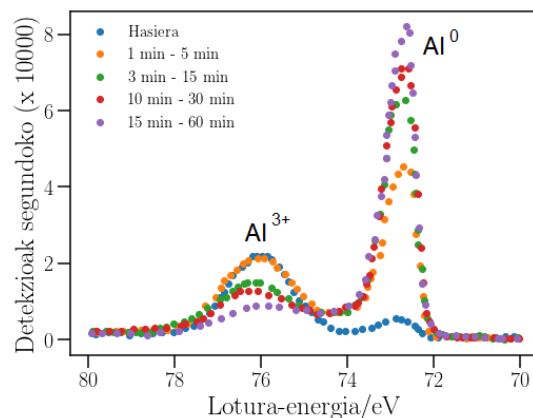
Irudia 4: a) azpirudian BSE bidez lorturiko laginaren gainazala ageri da, horretan ez da kontaminazio edo ezpurutasun nabarmenik ageri. b) eta c) azpirudietan a) azpirudian markaturiko *spectrum 1* puntuaren eta *spectrum 2* gainazalaren espektro konpositionalak ageri dira, hurrenez hurren. Aluminio laginak oxido geruza bat duela ondorioztatu daiteke, espektroetan oxigenoaren pikoa ageri baita. Ez da beste elementurik detektatu.

lectron Spectroscopy) bidezko azterketa egin da. Teknika horren bidez lagin baten gainazalaren lehenengo nanometroaren konposizioa aztertu daiteke, modu horretan aluminioaren gainazaleko oxido geruzaren lodiera neurtu ahal izan delarik. XPS teknikaren bitartez laginaren gainazala X izpien bidez erasotzen da eta bertatik elektroiak askatzen dira. Elektroiak detektagailua batean jaso, eta, horien kopurua eta energia zinetikoa aztertuz, laginaren gainazaleko konposizioa jakin daiteke, baita lagina osatzen duten elementuen egoera kimikoa ere. Teknika hori ioi-izpi bidezko erasoarekin konbinatu daiteke. Ioi-izpi bidezko erasoaren bitartez laginaren gainazala geruzaka eraunzten da, horien konposaketa XPS bidez aztertuz laginaren konposaketa lortu daiteke sakoneraren arabera.

5a irudia azaldutako teknika erabiliz lorturiko datuekin eraiki da, laginaren lehenengo nanometroetan ageri den oxigeno kopurua sakonerarekin murrizten dela ikus daiteke; aluminioa, ordea, sakonerarekin proportzio handiagoan ageri da. Nahiz eta sakonerarekin batera oxigeno kopurua asko murrizten den, ez da desagertzen. Horren zergatia ioi-izpien bidezko erasoaren bidez laginaren geruzak erauzten diren bitartean lagina arinki oxidatzen dela izan daiteke, nahiz eta froga huts-ganbera batean egin, aluminioak oxigenoarekin erreaktibitate altua baitu. 5b irudian aluminioaren egoera kimikoen (Al^{3+} eta Al^0) segundoko detektatu den seinale kopurua irudikatu da, XPS azterketaren denbora tarte ezberdinetarako. Hasieran, Al^{3+} ioiari dagokion tontorra Al^0 -ari dagokiona baino nabarmen handiagoa da (urdinez). Kontuan hartu, Al^{3+} ioiaren agerpenak aluminio oxidoaren (Al_2O_3) presentzia bermatzen duela. Al^{3+} eta Al^0 -aren joera hori aldatu egiten da XPS azterketa jarraitu eta laginaren geruza sakonagoak aztertu ahala. 60 minuturen ostean, Al^0 aluminioa da gailentzen dena, eta Al^{3+} aluminioa oso eskasa da (morez). Hori bat dator aluminio oxido geruza mehe baten presentziarekin. Aluminio gainazaleko oxido geruzaren lodiera $d \approx 30$ nm-koa dela estimatu da (gehien jota 31 nm).



(a) Aluminio- eta oxigeno-seinaleen arteko erlazioa laginaren sakoneraren menpe.



(b) XPS azterketa aurrera joan heinean lorturiko Al³⁺ eta Al⁰ segunduko detekzio-kopurua.

Irudia 5: XPS bidez lorturiko datuak erabiliz eraikiko grafikak, erabilitako laginaren konposaketaren inguruko informazioa ematen dutenak.

4 Neurketen emaitzak

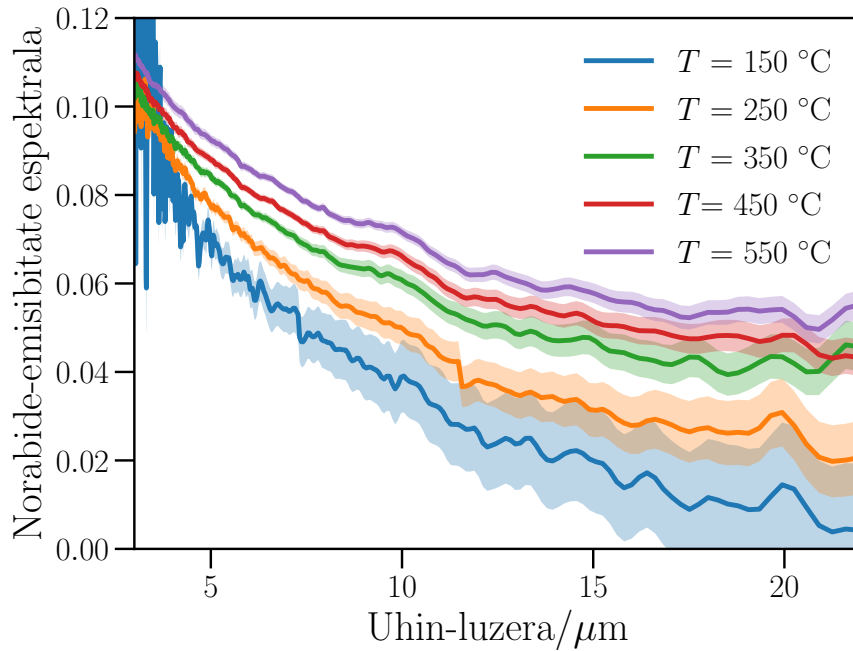
Atal honetan 3.3 atalean deskribaturiko laginaren emisibitate-neurketen emaitzak aurkeztuko dira, aurretik azaldutako metodoak erabiltzen lortu direnak.

4.1 Norabidezko neurketak

6. irudian $\theta = 10^\circ$ izanik tenperatura ezberdinetan lortutako emisibitate espektralaren datuak irudikatu dira. Teoria elektromagnetikoak auresaten duen moduan, tenperatura igotzearekin batera emisibitatearen balioek gora egiten dute.

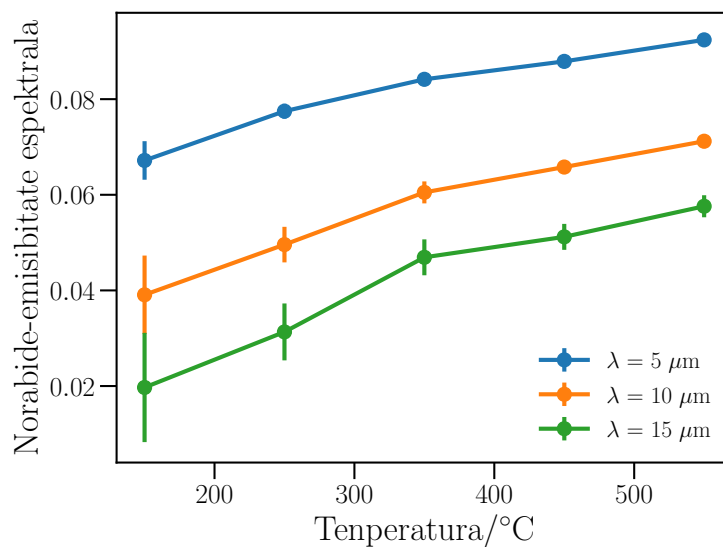
Zarata eta ziurgabetasunari dagokionez, metalek emisibitatearen balio baxuak izan ohi dituzte, eta, hortaz, horien tenperatura baxuetako neurketak egitean garatzen den seinalea oso ahula da. Horrek seinale-zatara erlazioa txikiarazten du, eta horregatik da hain nabaria tenperatura baxuetan zarataren eragina (batez ere 3 - 5 μm tartean). Ziurgabetasunari dagokionez, ordea, tenperatura baxuetan aluminio laginaren igorpena ganberaren edota tenperatura baxuko gorputz beltzaren igorpena baino baxuagoa da, uhin-luzera handienetarako batez ere. Horrek uhin-luzera handitzearekin batera neurketen ziurgabetasuna handitzea eragiten du. Bestetik, tenperatura altuagoetan emisibitateak balio altuagoak lortzen dituzte, neurtutako seinalea indartsuagoa da, eta zarataren eragina arindu egiten da eta ziurgabetasuna txikitu. Tenperatura altuetan laginaren tenperatura bihurtzen da ziurgabetasun-iturri nagusia: alde batetik, erabilitako termoparearen ziurgabetasuna kontuan hartu behar da, eta, bestetik, laginaren tenperaturaren inhomogeneotasuna [21]. Inhomogeneotasun horrek gora egiten du tenperatura altuetarako.

Ziurgabetasunen inguruan azaldutakoa [21] erreferentzian aurki daiteke, eta, bertan, argi ikus daiteke nikelaren kasuan ziurgabetasun-iturri ezberdinek zer ekarpen erlatibo egiten dioten neurketen ziurgabetasunari.



Irudia 6: Norabide-emisibitate espektrala ($\theta = 10^\circ$) zenbait temperaturarako. Neurketen erroreak ere adierazi dira.

7. irudiak $\theta = 10^\circ$ norabidean lorturiko esmisibitate espektralaren balioak erakusten ditu zenbait temperaturarako; $\lambda = 5$, $\lambda = 10$ eta $\lambda = 15\ \mu\text{m}$ -ko balioak erabili dira grafika egiteko. Horretaz gain, neurketen ziurgabetasuna ere adierazi da. Ikus daiteke nola hiru uhin-luzeratako datu multzoek temperaturaren arabera joera bera erakusten duten; uhin-luzera handitzearekin batera, emisibitatearen temperaturarekiko hazkuntza handitzen dela ere nabari da. Ikus daiteke nola, berriro ere, emisibitateak gora egiten duen temperaturarekin batera, eta nola temperatura baxuetan neurketaren ziurgabetasuna nabarmen handiagoa den.

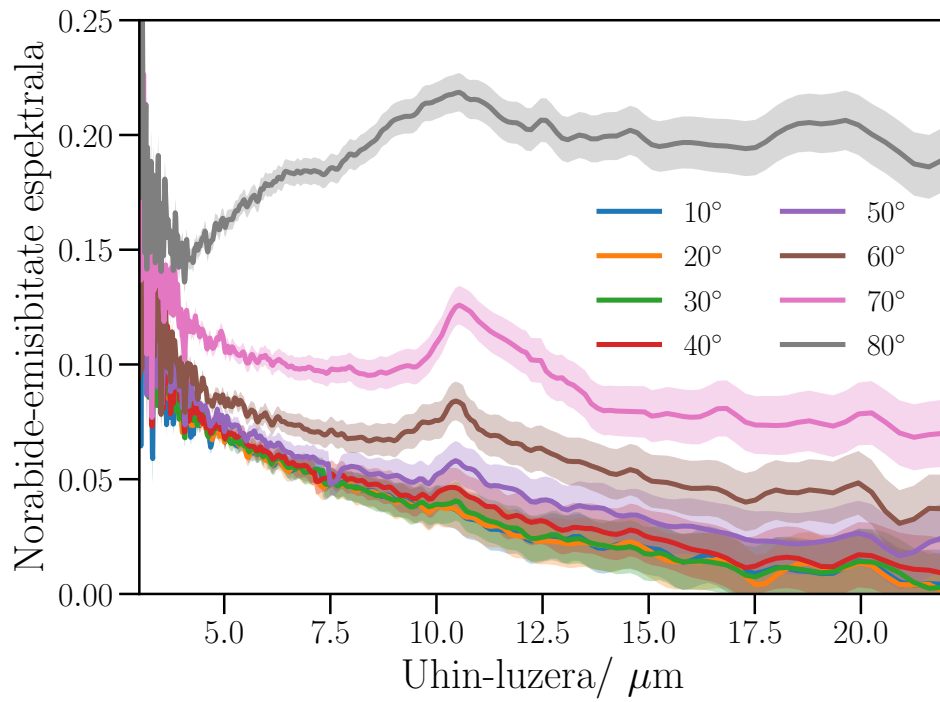


Irudia 7: Emisibitate espektrala ($\lambda = 10\ \mu\text{m}$ eta $\theta = 10^\circ$) temperaturaren arabera. Neurketen erroreak ere adierazi dira.

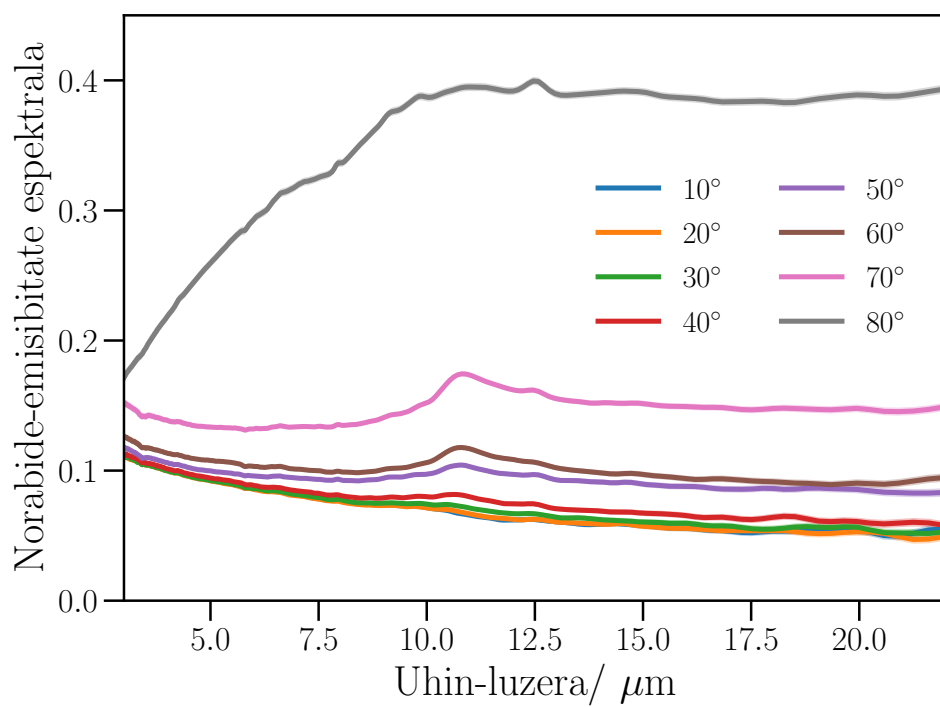
8. irudiak $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ eta $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tako aluminioaren emisibitate espektralaren kurbak erakusten ditu igorpen-angeluaren zenbait baliotarako. Metalen kasuan, emisibitateak gora egiten du θ angelua handitzearekin batera, $\theta = 90^{\circ}$ angeluaren inguruan izan ezik, non balio maximo batera heldu ostean, emisibitatearen balioa zero bihurtzen den [11]. Metalen emisibitatea, izatez, nahiko konstante mantendu ohi da $\theta = 50^{\circ}$ den arte, eta gero nabarmen handitzen da θ handitzearekin batera. Joera horiek argi agertzen dituzte 8. irudiko grafikoek: $\theta = 10^{\circ}$ 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. Tenperaturari erreparatuz, temperatura guztietan norabide-emisibitate espektralaren kurbek joera berdina erakutsi dute eta emisibitatearen balioek gora egiten dute temperatura handituz gero: 8a azpirudiko datuek, orokorrean, 8b azpirudiko datuek baino balio baxuagoak lortzen dituzte.

Esanguratsua da nabarmentzea $\lambda = 11\text{ }\mu\text{m}$ inguruan norabide-emisibitatearen kurbek erakusten duten tontorra, hori temperatura guztietako neurketetan agertzen da eta $\theta = 60^{\circ}$ eta $\theta = 70^{\circ}$ kurbetan nabaritzen da batez ere. Tontor horren jatorria 2.4 atalean azaldutako Berreman efektuan datza, horren inguruan aurrerago hitz egingo da.

Bi grafiketako neurketen ziurgabetasunen arteko ezberdintasuna ere nabaria da, 8b azpirudian ez dira ia nabaritzen ziurgabetasuna adierazten duten ilundutako guneak. Horren zergatia, lehenago azaldu den moduan, temperatura da: temperatura altuagoetan detektagailuan jasotzen den seinalea indartsuagoa da.



(a) $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$



(b) $T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$

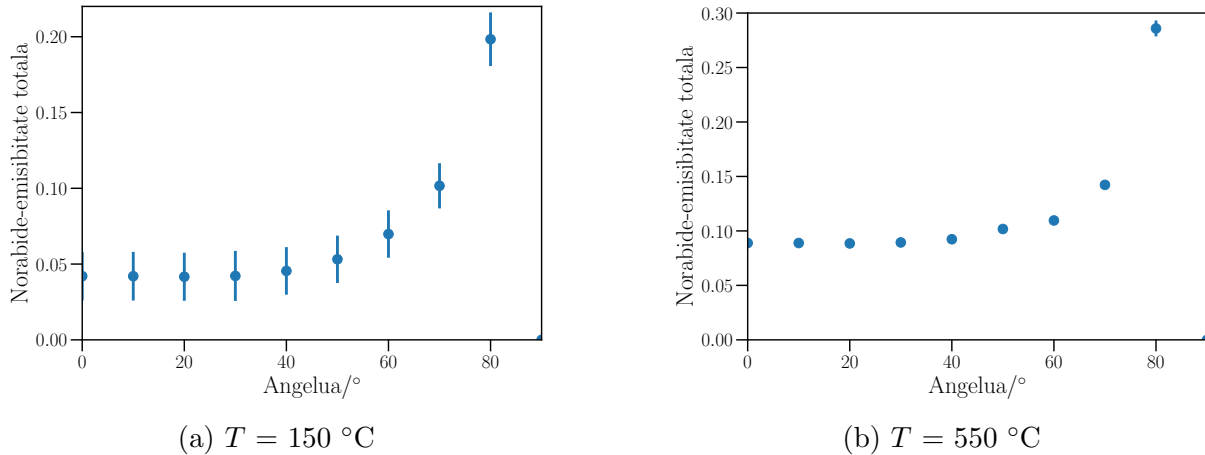
Irudia 8: Aluminioaren emisibitate espektrala angelu polarraren hainbat baliotarako, ilundurik neurketen ziurgabetasuna adierazi da.

4.2 Emisibitate total normala eta emisibitate total hemisferikoa

Materialen norabidezko neurketa espektralaren datuetatik abiatuz, norabide-emisibitate totalak eta emisibitate total hemisferikoa kalkulatu daitezke integrazio numerikoa aplikatuz [24].

Horretarako, lehendabizi, norabide-emisibitate totalen balioak lortu behar dira 5. ekuazioa erabiliz emisibitate espektralaren datuekin. Noski, konturatu lan honen bidez $\lambda \in [3, 22] \mu\text{m}$ tarte espektraleko datuak eskuratu direla, integrazioa, ordea, uhin-luzera guztietarako egin behar da. Horretarako goi-estimazio eta behe-estimazio bat egiten dira [21]. Ereku infragorrian, metalen emisibitateak joera beherakor monotonoa duenez, emisibitatearen balioak neurketa-tarteko muturretan lorturiko emisibitate-balioen eta emisibitatearen limite fisikoen artean (0 ala 1) egongo dira. Bestela esanda, $\varepsilon(\lambda < 3\mu\text{m})$ emisibitate-balioak $[\varepsilon(\lambda = 3\mu\text{m}), 1]$ balio-tartean kokatuko dira, modu antzekoan, $\varepsilon(\lambda > 22\mu\text{m})$ emisio-balioak $[0, \varepsilon(\lambda = 22\mu\text{m})]$ balio-tartean kokatuko dira. Behe-estimazioan $\varepsilon(\lambda < 3\mu\text{m}) = \varepsilon(\lambda = 3\mu\text{m})$ eta $\varepsilon(\lambda > 22\mu\text{m}) = 0$ egingo da. Goi-estimazioan, berriz, $\varepsilon(\lambda < 3\mu\text{m}) = 1$ eta $\varepsilon(\lambda > 22\mu\text{m}) = \varepsilon(\lambda = 22\mu\text{m})$ egingo da. Bi extrapolazioei 5. ekuazioa aplikatu eta lorturiko bi emaitzen batez bestekoa egitea norabide-emisibitate totala lortzeko estimazio ona dela ikusi da [21].

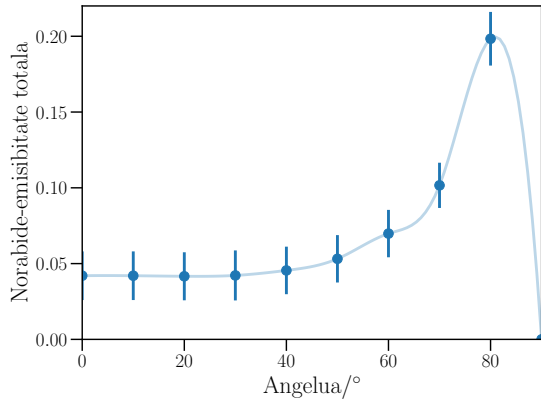
Esandakoa $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$ eta $T = 550\text{ }^\circ\text{C}$ -ko datu sortei aplikatuz, lortu diren norabide-emisibitate totalen datuak 9. irudian irudikatu dira.



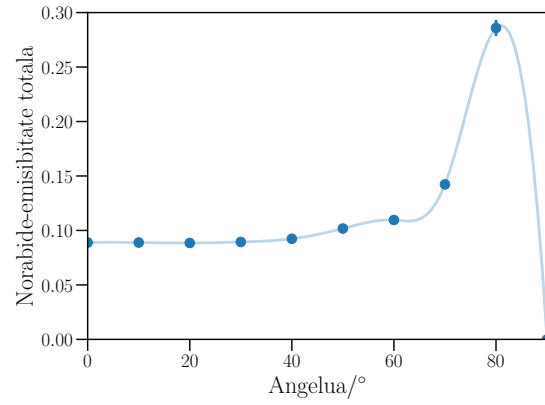
Irudia 9: Aluminioaren norabide-emisibitate totalen balioak igorpen-angeluaren balio ezberdinetarako eta bi tenperaturatan.

Bi grafikek joera berdina erakusten dute eta tenperatura igotzearekin batera, norabide-emisibitate totalaren datuek gora egin dute igorpen-angeluaren balio guztien kasuan.

Ondoren, emisibitate total hemisferikoa lortzeko, 6. ekuazioa aplikatu behar da. Horretarako, lehendabizi, norabide-emisibitate totalaren datuekin interpolazioa egiten da spline metodoaren bidez. Interpolazioa egiteko $\theta = 0^\circ$ eta $\theta = 90^\circ$ norabideen datuak gehitu dira. Teoriak dion moduan, $\varepsilon_T(\theta = 0^\circ) \approx \varepsilon_T(\theta = 10^\circ)$ denez, $\varepsilon_T(\theta = 0^\circ) = \varepsilon_T(\theta = 10^\circ)$ egin da. Horretaz gain, $\varepsilon_T(\theta = 90^\circ) = 0$ finkatu da. Interpolaturiko kurbak 10. irudian ikus daitezke.



(a) $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$



(b) $T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$

Irudia 10: Aluminioaren norabide-emisibitate totalen balioak eta interpolaturiko kurbak bi temperaturarako.

10a eta 10b azpirudietako grafikoei begira, norabide-emisibitate totalaren interpolaturiko kurbek bi kasuetan joera berdina erakusten dute. Horretaz gain, berriro ageri da norabide-emisibitate espektralak aztertzean ikusi den joera: $\theta = 0^\circ - \theta = 40^\circ$ tartean norabide-emisibitate totalaren balioa ez da nabarmenki aldatzen, eta aldaketa nabariak $\theta = 50^\circ$ -rik aurrera jazotzen dira. $\theta = 80^\circ$ inguruan emisibitatea maximo batera heldu ostean bere balioa zerora txikitzen da $\theta = 90^\circ$ denean.

Azkenik, interpolaturiko kurbei 6. ekuazioa aplikatuz, emisibitate total hemisferikoa kalkulatu daiteke. Hori eginez lorturiko datuak eta ziurgabetasunak 3. taulan bildu dira.

Taula 3: Temperatura ezberdinetan lorturiko emisibitate hemisferiko totalaren balioak eta horien ziurgabetasuna.

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Emisibitate total hemisferikoa	Ziurgabetasun estandarra
150	0.066	0.008
250	0.087	0.003
350	0.102	0.002
450	0.107	0.002
550	0.114	0.002

Taulako balioei erreparatuz, emisibitate total hemisferikoak temperaturarekin gora egin duela ikus daiteke, metalen teoria elektromagnetikoak aurreratuena [11]. Bestetik, horrekin lotutako ziurgabetasunak temperatura igotzearekin batera behera egiten du, norabidezko neurketen kasuan egin duen moduan.

4.3 Emisibitate polarizatuaren azterketa

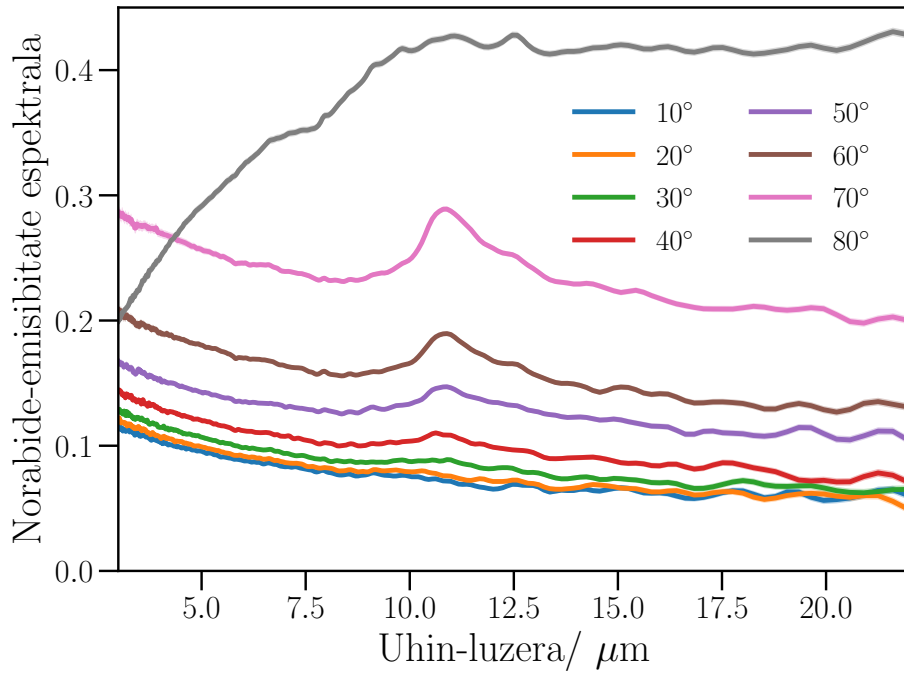
Polarizatzaile baten laguntzaz $T = 550$ °C-tan emisibitatearen osagai polarizatuak (S eta P) aztertu ahal izan dira, bi polarizazioen norabidezko neurketa espektralen emaitzak 11. irudian ikus daitezke.

Bi polarizazioetan lorturiko emaitzen arteko ezberdintasuna ukaezina da, bai haien artean eta bai polarizatu gabeko emisibitateekin alderatzerako orduan (8b azpirudia). Argi dago bi polarizazioek ez dutela ekarpen berdina egiten 23. ekuazioaren bitartez lortzen den emisibitatean. θ angeluaren balio baxuen eta $\theta = 80^\circ$ balioaren kurbek soilik kontratzen dute antzekotasuna bi polarizazioak parekatzean, nahiz eta $\theta = 80^\circ$ kurbak S polarizazioan (11b azpirudia) balio baxuagoak hartzen dituen.

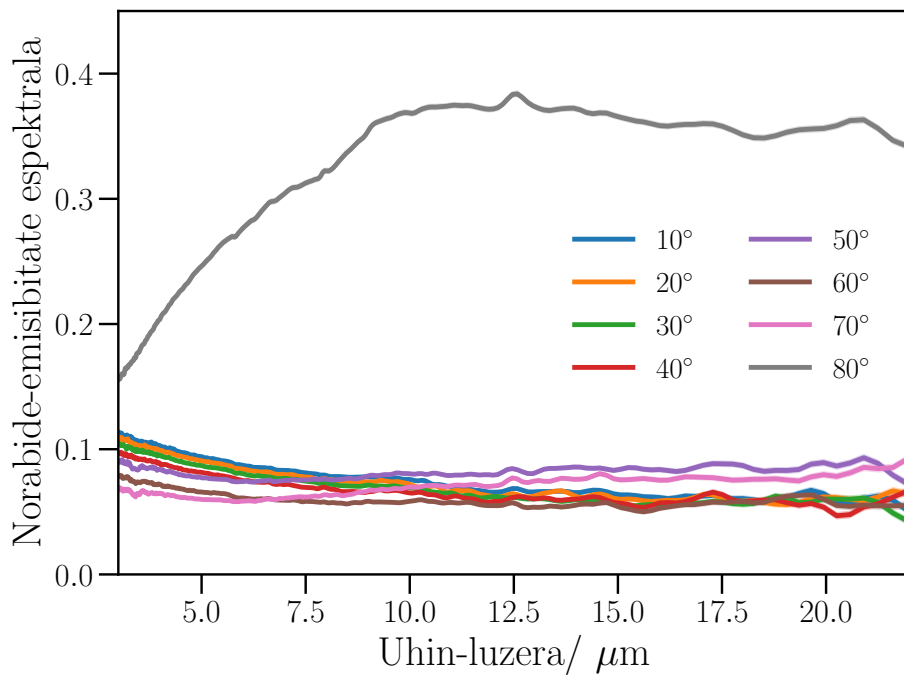
P polarizazioan (11a azpirudia) emisibitateak orokorrean balio altuagoak lortzen ditu, eta norabide ezberdinetako kurben arteko aldea handiagoa da S polarizazioan lorturiko kurben arteko aldearekin alderatuz. S polarizazioan, $\theta = 80^\circ$ -ko kurba izan ezik, besteek balio eta joera antzekoak erakusten dituzte, P polarizazioan gertatzen denaren joera guztiz ezberdina dute. Horretaz gain, uhin-luzera baxuko datuei erreparatuz ($3 - 10 \mu\text{m}$), S polarizazioan orduan eta θ handiagoa izan, kurbek orduan eta balio baxuagoak hartzen dituzte ($\theta = 80^\circ$ kasua izan ezik). Joera hori P polarizazioan lortutakoarekin kontrakoa da, baita norabidezko neurketetan lortutakoarekin ere (8b azpirudia).

Garrantzitsua da aipatzea $\lambda = 11 \mu\text{m}$ inguruan emisibitateak erakusten duen tontorra guztiz polarizatu dagoela, P polarizazioaren datuetan soilik aurki baitaiteke. Tontor hori, gainera, $\theta = 50^\circ$ denetik aurrera agertzen hasi eta θ handitzearekin batera nabariagoa egiten da. Joera hori guztiz bat dator Berreman efektua emateko beharrezkoak diren ezaugarriekin, 2.4 atalean azaldu direnak.

Emisibitatearen maximo lokal horren jatorria aluminioaren gainazalean sortzen den aluminio oxido geruza mehean datza. 3.3. atalean azaldu den moduan, gainazal honen lodiera gehien jota 31 nm-koa da, hau da, espektro infragorriko uhin-luzerak baino askoz meheagoa da. Maximo hori Voigt funtzioen bidez modelizatu daiteke (ikus 12. irudia). Voigt funtzioa funtzio Gaussiar eta funtzio Lorentziarren arteko konboluzioa da. Voigt funtzioen bidezko doiketa Focus programaren bidez egin da eta horretan oinarrituz aluminio oxido geruza amorfoa edo kristalinoa den jakin daiteke, baita bere lodieraren hurbilketak bat lortu ere [19]. Hori, ordea, etorkizunean aztertuko den gaia da. [25] erreferentzian aluminio oxido gainazal-mehen LO fonoi optikoaren erresonantzia $\nu = 935 \text{ cm}^{-1}$ -ean neurtu da, lan honetan lorturiko emaitzetan, ordea, maximoa $\nu = 925 \text{ cm}^{-1}$ -ean kokatzen da. Bi maiztasun horien arteko aldearen arrazoia aztertutako laginen ezberdintasuna izan daiteke. [25] erreferentziako aluminio oxidozko geruzak aluminioa molibdeno gainean depositatuz, eta, ondoren, hori H_2O erabiliz oxidatuz lortu dira.



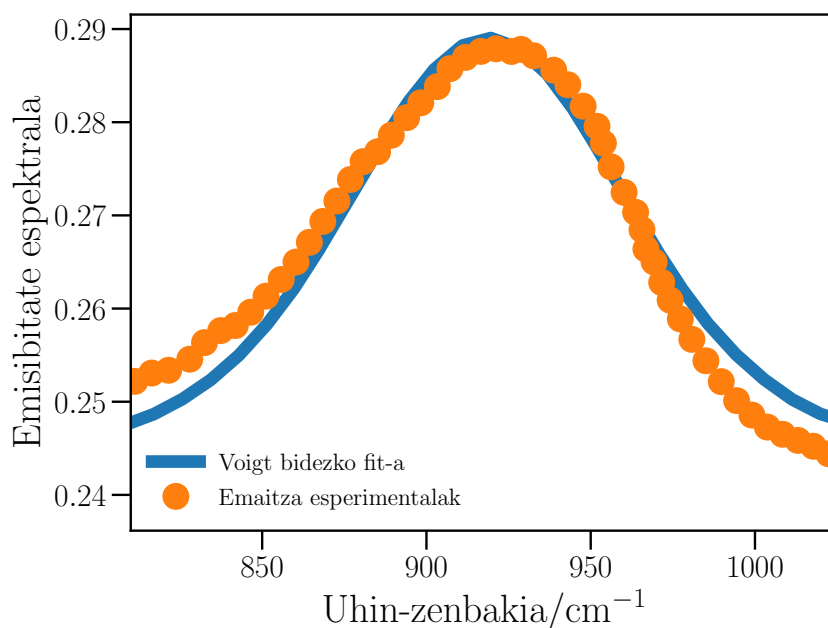
(a) P polarizazioa



(b) S polarizazioa

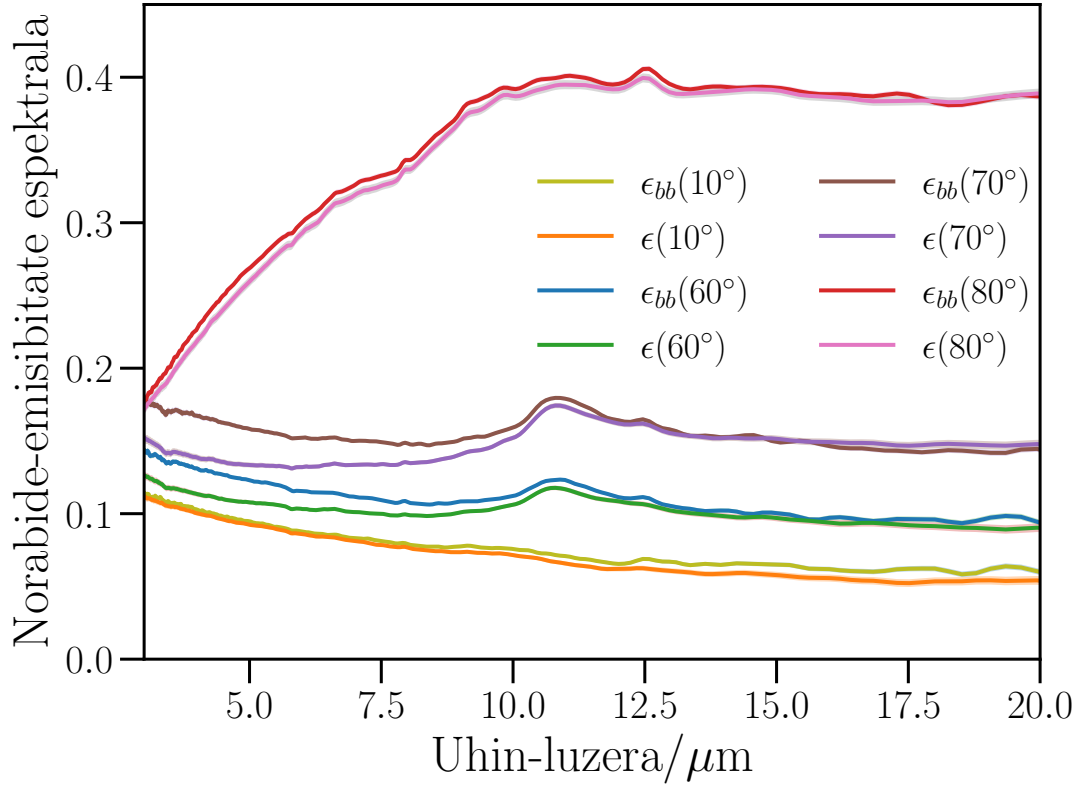
Irudia 11: Aluminioaren norabide-emisibitate espektralaren balioak igorpen-angeluaren balio ezberdinetarako P eta S polarizazioetan, $T = 550^\circ$ izanik.

[26] erreferentzian aurki daitezkeen aluminioaren emisibitate espektralaren neurketen 10.5 - 11 μm uhin-luzera tartean lan honetan aurkitu den maximo lokala topatu daiteke. Erreferentzia horretan, aluminioa oxidatzearekin batera emisibitatearen maximo lokala nabariagoa egiten dela ikusten da. Horrek, lehenago esan den moduan, lorturiko maximo lokala aluminio gainazalean sortzen den oxido geruzarekin erlazionatzen du.



Irudia 12: Emisibitate espektral P polarizatuaren datuetan ageri den tontorra ($\theta = 70^\circ$) eta Voigt funtzioaren bidez eginiko doiketa. Tontorraren muturra 925 cm^{-1} -an kokatzen da, $\lambda = 10.8 \text{ }\mu\text{m}$ dena.

Azkenik, emisibitatearen osagai polarizatuak 23. ekuazioan ordezkatzuz lorturiko emisibitatea (bi osagaien batz bestekoa eginez lorturikoa, ε_{bb}) 8b azpirudiko emisibitate ez-polarizatuarekin parekatu da 13. irudian. $\theta = 10^\circ - 50^\circ$ tarteko norabideen datuek joera eta balio antzeko dituztenez, $\theta = 10^\circ$ kurba soilik irudikatu da grafikaren argitasuna eta ulergarritasuna bermatzeko. Argi ikusten da nola $\theta = 10^\circ$ eta $\theta = 80^\circ$ norabideetan 23. ekuazioak emandako emisibitateak eta neurtutako emisibitate ez-polarizatuak praktikoki berdinak diren, bai joerari dagokionez, bai balioei dagokienez. $\theta = 60^\circ$ eta $\theta = 70^\circ$ norabideen kasuan, ordea, kurbek $\lambda = 10 \text{ }\mu\text{m}$ baino balio handiagoentzat balio eta joera antzekoa erakusten badituzte ere, $\lambda = 3 - 10 \text{ }\mu\text{m}$ tartean 23. ekuazioa erabiliz lorturiko emisibitateak balio nabarmen altuagoak lortzen ditu. Horren arrazoia uhin-luzera baxuetan bi osagai polarizatuak emisibitate-ez polarizatuan ekarpen berdina ez egitean datza. P polarizazioan dagoen emisibitateak S polarizazioan dagoen emisibitateak baino ekarpen txikiagoa izango du, eta horregatik 23. ekuazioaren bitartez, bi polarizazioei pisu berdina ematen zaienez, lorturiko emisibitatea neurtutakoa baino altuagoa da.



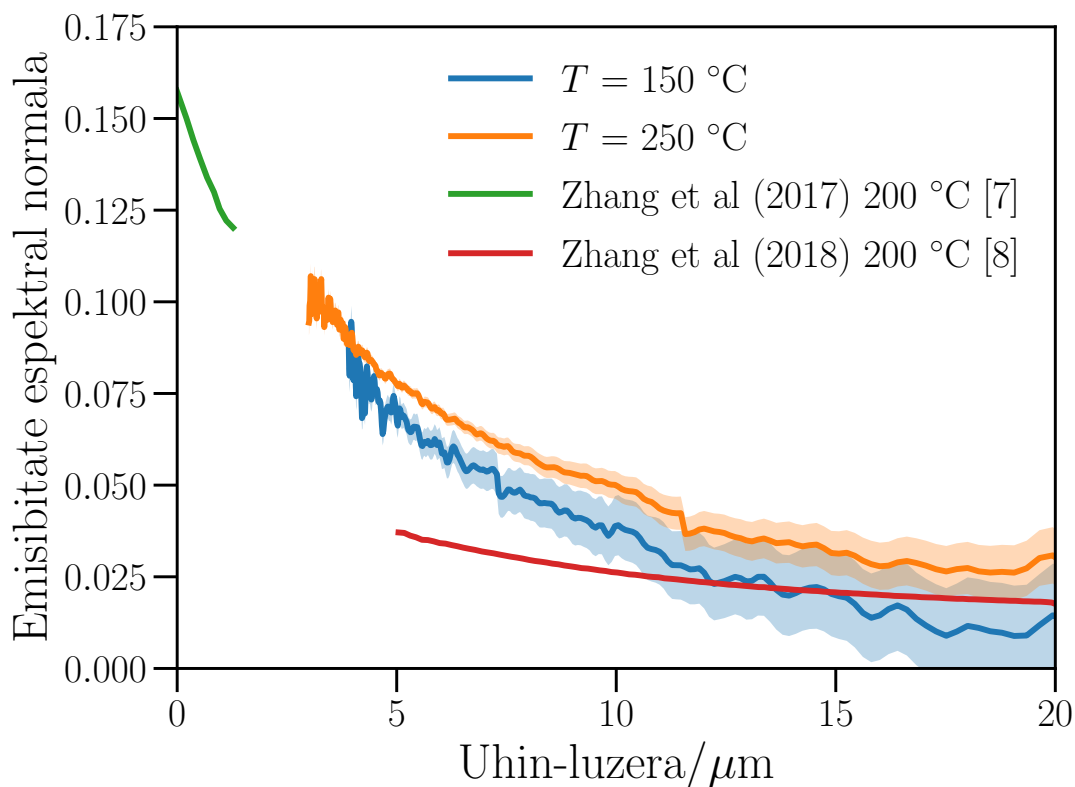
Irudia 13: Polarizatu gabeko emisibitatearen balioak (ϵ) 23. ekuazioaren bidez lortzen diren emisibitatearen balioekin (ϵ_{bb}) batera irudikatu dira, norabide ezberdinetan eta $T = 550$ °C izanik.

4.4 Datuen konparaketa

Atal honetan, lorturiko emaitzak literaturan aurki daitezkeen balioekin alderatuko dira.

Emisibitate normalari dagokionez ($\theta = 0^\circ$), uhin-luzera bakarrean neurturiko bi datu-multzo [9, 10] eta lan honetan erabili den antzeko tresna multiespektral batekin 100 eta 400 °C artean egindako neurketak [7, 8] aurkitu dira literaturan. Konturatu lan honetan ez dela zuzenean emisibitate normala neurtu, baina $\theta = 10^\circ$ norabidean lortutako datuak erabili dira parekatzea egiteko; zeren eta, 4.1 atalean azaldu den moduan, ez ohi dago ezberdintasun garrantzitsurik $\theta = 0^\circ$ eta $\theta = 10^\circ$ -tan neurtutako datuen artean. 14. irudian, lan honetan 150 eta 250 °C-tan eta Zhange lanetan 200 °C-tan lortutako emaitzak alderatzen dira. Zhange neurketak 0.8 - 2.2 μm eta 5 - 20 μm tartean eginda daude. Bi neurketa-multzoetan erabilitako laginek %99.6-ko purutasuna eta $R_a = 0.08$ μm -ko batzbesteko zimurtasuna dute. Kasu guztietan emisibitateak behera egiten du uhin-luzera handitzearekin batera (ikus 14. irudia). Zhange uhin-luzera laburren emaitzak (berdez) lan honetan aurkeztutako emaitzekin bat datoz. Zhange uhin-luzera luzeetako emisibitatearen datuek (gorriz), ordea, antzeko portaera kualitatiboa badute ere, baxuagoak dira 5-12 μm tartean. Emisio-balioetan dagoen alde horren arrazoi nagusia aluminio-laginen gainazaleko egoera ezberdinei zor zaio. Lan honetan erabilitako laginarekin konparatuz, batzbesteko zimurtasuna txikiagoa dute Zhange erabilitako laginek, eta zenbat eta zimurtasun txikiagoa izan, orduan eta gutxiago emititzen da [11].

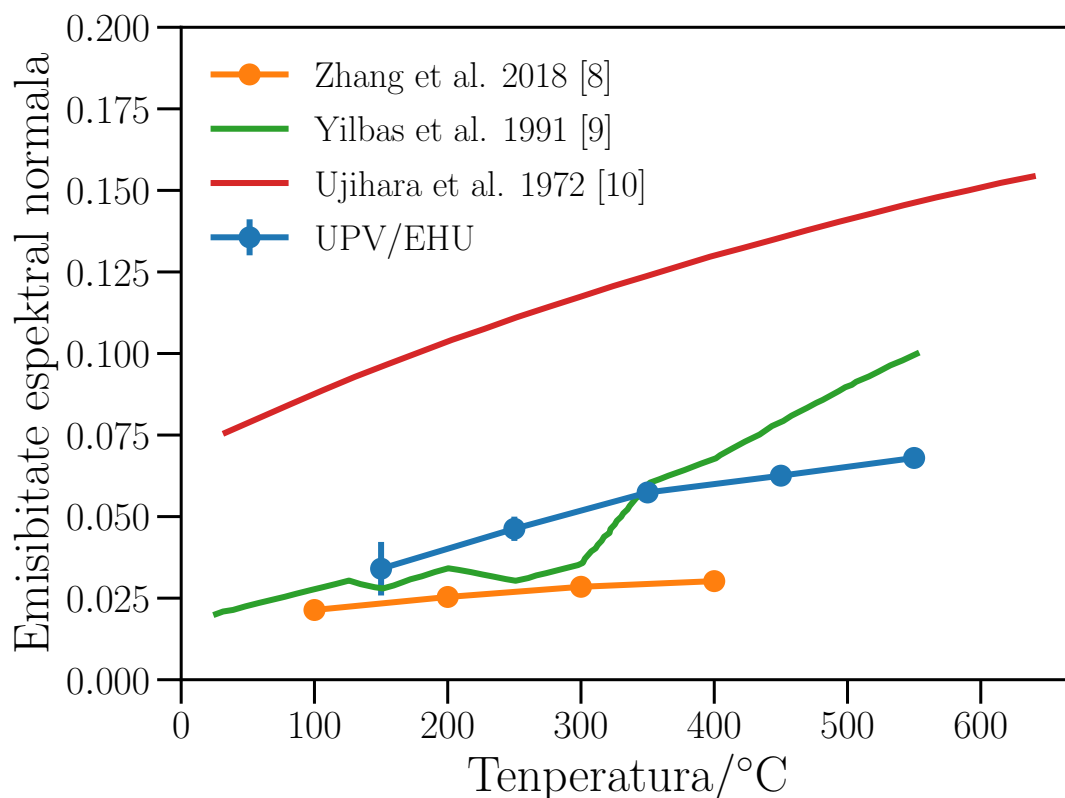
Uhin-luzera bakarreko tekniken bidez lortutako datuekin ere alderatu daitezke lan ho-



Irudia 14: Aluminioaren emisibitatea tenperaturaren arabera literaturan topatutako datuekin konparatuz.

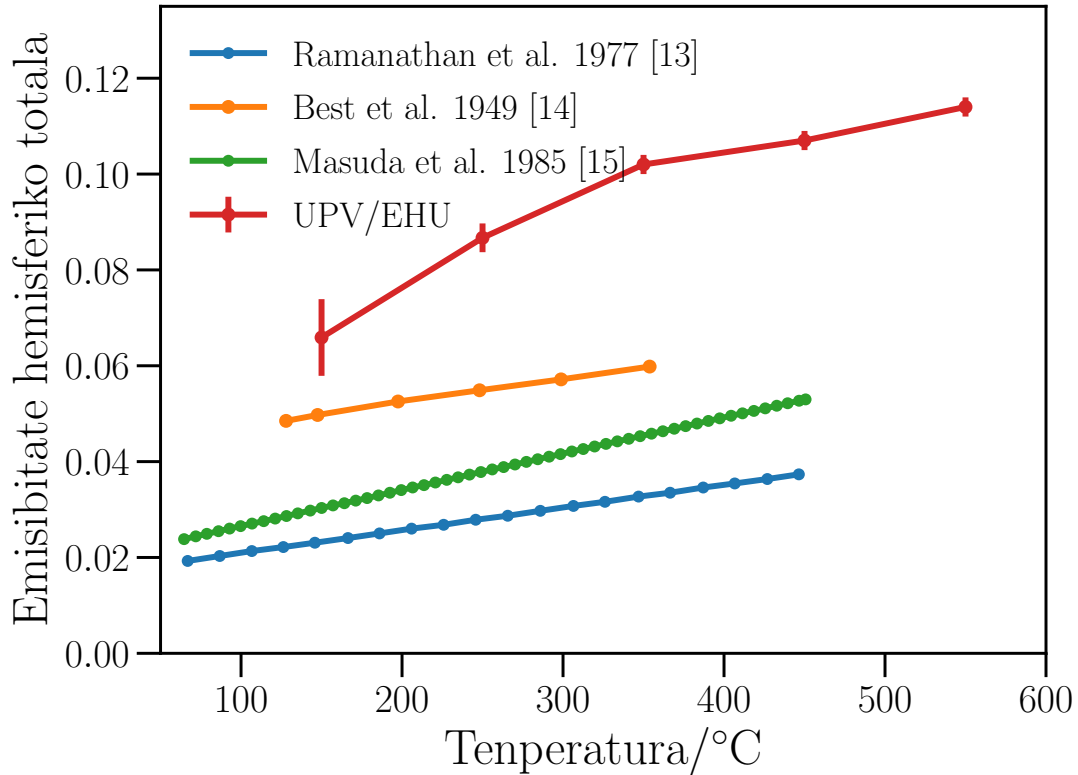
netan lorturiko emaitzak [9, 10]. 15. irudian, $10.6 \mu\text{m}$ -tako emisibitate-datuak literaturan aurkitutakoekin alderatzen dira. Emaitza guztietan emisibitatea tenperaturarekin batera handitzen bada ere, emandako balioetan sakabanatze handia dago. Yilbasen lanean [9] egindako neurketen kasuan, lan honetan aurkeztutako datuen antzeko joera dutela egiaztatatu da. Hala ere, emaitzetan ziurgabetasuna dagoela nabarmendu behar da, aluminioak uhin-luzera luzeetan duen emisibitatearen balio txikia dela eta. Gainera, ezadostasun metodologikoak daude. Zhangek metodo multiespektrala (FTIR) erabiltzen badu ere, Yilbasek erreflektantzia-esperimentuetan oinarritutako zeharkako metodo bat erabiltzen du; Ujiharak, ordea, eredu teoriko bat erabiltzen du [10]. Azken horrek edozein esperimentutan neurtutako balioak baino askoz balio handiagoak aurratsatu ditu. Azkenik, jada esan den bezala, laginen gainazaleko egoerak emaitzak baldintzatzen ditu; Yilbasek, esaterako, ez du ematen erabilitako materialen zimurtasun-baliorik. Laburbilduz, bibliografian dauden emaitzekin egindako alderaketaren arabera, argi dago emisibitate neurketekin batera gainazalaren karakterizazioa egin behar dela, zimurtasunaren aldaketek eta oxidazioak neurtutako balioetan aldaketa handiak eragin ditzakete eta. [11, 27]

Emisibitate hemisferiko totalaren konparaketa ere egin da 16. irudiaren bitartez, horretan lan honetan lorturiko datuak beste ikerketa batzuetan lorturiko datuekin parektu dira [13–15]. Ikus daiteke, bai lan honen bitartez lorturiko emisibitate-balioak, bai literaturan topaturiko balioek gora egiten dutela tenperaturarekin. Azken horiek joera linealagoa dute lan honetan lorturiko datuekin alderatuz, eta aurkezten dituzten emisibitate-balioak UPV/EHUn lorturikoak baino baxuagoak dira.



Irudia 15: Aluminioaren emisibitate espektral normala temperaturaren arabera bibliografiaren datuen ondoan. Datuak $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ uhin-luzeran harturik daude.

Kontuan hartzekoa da beste ikerketak kalorimetria mota ezberdinak erabiliz garatu direla: Bestek *steady-state* motako kalorimetria erabili du [14]; Masudak eta Ramanathanek, ordea, *transient* motako kalorimetria [13, 15]. Horretaz gain, Masudak aluminio lagina mekanikoki pulitu dela adierazten du, Bestek ere lagina mekanikoki pulitu du eta Ramanathanek lagina elektrikoki pulitu du. Purutasunari dagokionez, Masudak %99.98 purutasuneko aluminio lagina erabili dute eta Ramanathanek 5N purutasuneko (%99.999) lagina erabiltzen du, Bestek ez du purutasunaren inguruko informazio zehatzik ematen. Laginaren konposaketa ezberdinek, zein pulitze teknika ezberdinek sortu ditzaketen gainazal egoeren arteko aldeak ere eragin dezake emaitzen desadostasunean, lehenago esan den moduan.



Irudia 16: Aluminioaren emisibitate hemisferiko totala tenperaturaren arabera bibliografiaren datuen ondoan.

5 Ondorioak

Lan honetan purutasun handiko aluminio laminatu lagin baten norabide-emisibitatea neurtu da, 150 - 550 °C tenperatura tartean eta 3 - 23 μm uhin-luzera tartean. Norabide-emisibitatearen azterketa egiteaz gain, emaitza horietatik abiatuz norabide-emisibitate totala eta emisibitate total hemisferikoaren datuak lortu ahal izan dira. Kasu guzti horietan, datuek teoriak auresandako joera aurkeztu dute. Aluminio laginaren emisibitate polarizatua ere ikertu ahal izan da. Ikusi da nola emisibitateak joera oso ezberdina aurkezten duen S eta P polarizazioetan, eta nola bi polarizazioen osagaiek ez duten ekarpen berdina egiten 23. ekuazioan.

Norabide-emisibitatearen kurbetan maximo lokal bat agertu da $\lambda = 11 \mu\text{m}$ uhin-luzerarako. Maximo horren jatorria aluminio gainazalean detektatu den alumina geruza mehean datza, eta Berreman efektuak azaltzen du. Efektu hori gertatzeko kondizio guztiak jazotzen dira (maximo lokala P polarizazioan soilik ageri da, igorpen zeharreen nabarmentzen da eta alumina geruzaren lodiera espektru infragorriko uhin luzerak baino laburragoa da). Alumina geruza detektatu eta karakterizatu da SEM-EDS eta XPS teknikak erabiliz, eta modu horretan baieztatu ahal izan da geruzaren lodiera mehea (gehien jota 31 nm). Gai honen inguruko ikerketa etorkizunean jarraituko da, lorturiko datuetan oinarrituz alumina geruzaren inguruko ezagutza lortu baitaiteke, hala nola bere lodiera edota egituraren inguruko informazioa.

Lorturiko emaitzak literaturan aurkitu daitezkeen datuekin parekatzean, datu multzoek, orokorrean, joera kualitatibo berdina erakutsi dute. Kuantitatiboki, ordea, desa-

dostasuna dago. Hori azaltzeko, kontuan hartu beharrekoa dira laginaren gainazalaren egoerak eta laginaren purutasunak emisibitatean duten efektua. Beharrezkoa suertatzen da emisibitatearen datuak aurkeztearekin batera ikerturiko laginaren karakterizazioaren inguruko informazioa ere gehitzea. Modu horretan, datuen konparaketa eta balioztatze hobeak egin ahalko lirateke. Etorkizunean, literaturan aurki daitezkeen datuen azterketa sakona egin ahalko litzateke, eta teoria elektromagnetikoa erabiliz, ageri diren desadostasunen azalpen zehatzagoak eman ahalko lirateke.

Esan beharra dago ere, literaturan aurkitu den aluminioaren erradiazio-propietateen inguruko informazioa eskasa dela eta osatu gabea. Aluminioa hain metal hedatuaenez, egoera hori kontraesankorra da. Lan honetan aztertu den lagina industria-prozesuetan erabili ohi den aluminioaren lagin adierazgarria da (purutasun handiko aluminio laminatua). Hortaz, lorturiko emaitzek, literaturan dagoen informazioa osatzeaz gain, prozesu-industrialak optimizatzea ere ahalbidetzen dute.

Azkenik, neurketen zehaztasuna ziurtatzeko eredu matematiko fidagarriak izatea dagoen erronka nagusienetako bat da. Hortaz, lan hau etorkizunean osatu ahalko litzateke emisibitatean eragina duten parametroak (hala nola, zimurtasuna edo oxido geruzak) kontuan hartuta.

6 Eskerrak

Lan honi amaiera emateko, azken lerro hauen bitartez Gabriel, Telmo eta Iñigorekiko dudan eskerra adieraztea baino ez zait gelditzen, haiek erakutsitako prestasuna, eskainitako laguntza eta emandako aukerak benetan ezin hobeak izan baitira. Haiekin batera giro bikainean lan egin ahal izateak ez dit soilik nire ezagutza zientifikoa zabaltzea ahalbidetu, etorkizunean guztiz baliagarria izango zaidan esperientziaz eta motibazioz ere bete nau. Mila mila esker hiruoi!

Erreferentziak

- [1] MJ Freiría Gándara. Aluminium: the metal of choice. *Materials and Technology*, 47(3):261–265, 2013.
- [2] RE Sanders. Technology innovation in aluminum products. *JOM*, 53(2):21–25, 2001.
- [3] M Doro, D Bastieri, A Biland, F Dazzi, L Font, M Garczarczyk, M Ghigo, E Giro, F Goebel, R Kosyra, E Lorenz, M Mariotti, R Mirzoyan, L Peruzzo, G Pareschi, and J Zapatero. The reflective surface of the magic telescope. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 595(1):200–203, 2008.
- [4] JP Rozelot, R Bingham, and DD Walker. Aluminium mirrors versus glass mirrors. In *European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings*, volume 42, page 71, 1992.
- [5] I Apraiz Imatz, FJ Alonso Orcajo, and B Gambin. Diferentes tecnicas end mediante termografia infraroja. aplicaciones en la industria aeroespacial. *DYNA*, 80(4):35–38, 2005.
- [6] R Usamentiaga, P Venegas, J Guerediaga, L Vega, J Molleda, and FG Bulnes. Infra-red thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, 14(7):12305–12348, 2014.
- [7] K Zhang, K Yu, and Y Liu, Yand Zhao. Effect of surface oxidation on emissivity properties of pure aluminum in the near infrared region. *Materials Research Express*, 4(8):086501, 2017.
- [8] K Zhang, Y Zhao, K Yu, and Y Liu. Development of experimental apparatus for precise emissivity determination based on the improved method compensating disturbances by background radiation. *Infrared Physics & Technology*, 92:350–357, 2018.
- [9] BS Yilbas, K Danisman, and Z Yilbas. Measurement of temperature-dependent reflectivity of Cu and Al in the range 30-1000 °C. *Measurement Science and technology*, 2(7):668, 1991.
- [10] K Ujihara. Reflectivity of metals at high temperatures. *Journal of Applied Physics*, 43(5):2376–2383, 1972.
- [11] JR Howell and R Mengüç, MP Siegel. *Thermal radiation heat transfer*. CRC press, 2010.
- [12] T Králík, V Musilová, P Hanzelka, and J Frolec. Method for measurement of emissivity and absorptivity of highly reflective surfaces from 20 K to room temperatures. *Metrologia*, 53(2):743, 2016.
- [13] KG Ramanathan, SH Yen, and EA Estalote. Total hemispherical emissivities of copper, aluminum, and silver. *Applied optics*, 16(11):2810–2817, 1977.
- [14] G Best. Emissivities of copper and aluminum. *Journal of the Optical Society of America*, 39(12):1009–1011, 1949.

- [15] H Masuda and M Higano. Transient calorimetric technique for measuring total hemispherical emissivities of metals with rigorous evaluation of heat loss through thermocouple leads. *Journal of the Optical Society of America A*, 2(11):1877–1882, 1985.
- [16] L Li, K Yun, K Zhang, Y Liu, F Zhang, and Y Liu. Accuracy improvement for directional polarized spectral emissivity measurement in the wavelength range of 4–20 μm . *Experimental Thermal and Fluid Science*, 125:110379, 2021.
- [17] M Dressel and G Grüner. *Electrodynamics of solids: optical properties of electrons in matter*, 2002.
- [18] DW Berreman. Infrared absorption at longitudinal optic frequency in cubic crystal films. *Physical Review*, 130(6):2193, 1963.
- [19] B Harbecke, B Heinz, and P Grosse. Optical properties of thin films and the Berreman effect. *Applied Physics A*, 38(4):263–267, 1985.
- [20] P Grosse, B Harbecke, B Heinz, R Meyer, and M Offenbergl. Infrared spectroscopy of oxide layers on technical Si wafers. *Applied Physics A*, 39(4):257–268, 1986.
- [21] I González de Arrieta, T Echániz, R Fuente, JM Campillo-Robles, JM Igartua, and GA López. Updated measurement method and uncertainty budget for direct emissivity measurements at the university of the basque country. *Metrologia*, 57(4):045002, 2020.
- [22] R Pérez-Sáez, L Del Campo, and MJ Tello. Analysis of the accuracy of methods for the direct measurement of emissivity. *International Journal of Thermophysics*, 29(3):1141–1155, 2008.
- [23] JI Goldstein, DE Newbury, JR Michael, NWM Ritchie, JHJ Scott, and DC Joy. *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer, 2017.
- [24] I González de Arrieta. High-temperature infrared emissivity of materials for alternative energy applications, 2020.
- [25] M Kaltchev and WT Tysoe. An infrared spectroscopic investigation of thin alumina films: measurement of acid sites and surface reactivity. *Surface science*, 430(1-3):29–36, 1999.
- [26] PM Reynolds. Spectral emissivity of 99.7% aluminium between 200 and 540 $^{\circ}\text{C}$. *British Journal of Applied Physics*, 12(3):111, 1961.
- [27] CD Wen and I Mudawar. Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models. *International journal of heat and mass transfer*, 48(7):1316–1329, 2005.