



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

V. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2023ko maiatzaren 17, 18 eta 19a
Donostia, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 3.0

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Fase-aldaketan oinarritutako
hozte-sistemen bero-
transferentziaren analisi
esperimental**

*Leire Arrieta Lizarazu,
Peru Fernandez Arroiabe,
Joanes Berasategi Arostegui
eta Manex Martinez Agirre*

167-174 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.v.03.22>

ANTOLATZAILEA:



BABESLEAK:



LAGUNTZAILEAK:



Fase-aldaketan oinarritutako hozte-sistemen bero-transferentziaren analisi esperimentalak

Leire Arrieta-Lizarazu, Peru Fernandez-Arroiabe Txapartegi, Joanes Berasategi, Manex Martinez-Agirre

Fluido-mekanika taldea, Mekanika eta Industria Ekoizpen Saila, Mondragon Unibertsitateko Goi Eskola Politeknikoa,
Loramendi 4, 20500, Arrasate

leire.arrietal@alumni.mondragon.edu

Laburpena

Ikerketa honetan fase-aldaketan oinarritzen den murgiltze bidezko hozte-sistema aztertu da, *pool boiling* bezala ezagutzen dena, ohiko aire bidezko hozte-sistemaren aldean bero gaitasun handiagoa baitu. Hozketa-prozesu hau geroz gehiago erabiltzen da, esaterako datu-zentroetan edo auto elektrikoaren baterietan. Fenomeno hau deskribatzen duen *pool boiling* kurbak karakterizatu dira kobrezko gainazal leundua presio atmosferikoan ikertuz. Novec – 7000 likido dielektrikoaren portaera aztertu da horretarako set-up esperimentalak diseinatuz. Lortutako emaitzetatik, gainazalaren tenperaturaren bilakaera aztertu da bero-fluxuarekiko.

Hitz gakoak: Fase-aldaketa, *Pool boiling*, Murgiltze bidezko hozte-sistema, Likido dielektrikoa

Abstract

This paper analyses the immersion cooling system, based on the phase change of the fluid, known as pool boiling, for its higher heat capacity compared to the conventional air-cooled system. This type of system is used in data centres or in the batteries of electric cars. The pool boiling curves describing this phenomenon have been characterised by analysing a polished copper surface at atmospheric pressure. The behaviour of the dielectric liquid Novec -7000 has been analysed using a set-up designed for this purpose. From the results obtained, the evolution of the boiling surface temperature with respect to the heat flux has been studied.

Keywords: Phase change, Pool boiling, Immersion cooling, Dielectric liquid

1 Sarrera eta motibazioa

Aire bidezko hozte-sistemen teknologia oso aurreratuta dago, eta eguneroko hainbat sistematan erabiltzen da. Horren adibide argiak dira datu-zentroak edo datuak prozesatzeko zentroak. Jakina da teknologiaren eboluzio bizkorra dela eta, enpresak gero eta abiadura handiagoetan lan egitera behartuta daudela, horrek datuen prozesamenduan eragin zuzena duela. Hori horrela, datu-zentroetan, enpresa baten datuak prozesatzeko beharrezko baliabideak aurkitzen dira: ekipamendu elektronikoak, ordenagailuak, komunikazio sareak... non hozte-prozesua erabat lotuta dagoen energia kontsumoarekin. Beraz, hozte-sistema egoki baten bidez energia aurrezteak lortzen da, izan ere, ekipoei sortzen duten beroa baita arazo nagusienetakoa bat.

Datu-zentroetan hainbat hozte-sistema desberdin erabili dira tradizionalki. Gaur egun, aire bidezko hozte-sistemak ordezkatu nahi dira bero gaitasun gehiago daukaten eta gero eta maizago ezartzen ari diren murgiltze bidezko hozte-sistemengatik. Murgiltze sistemaren oinarria (*Immersion Cooling* bezala ere ezagutua) zerbitzariak likido dielektriko batean sartuta daudela da. Hala, osagai beroekin zuzenean kontaktuan dagoen likido dielektrikoak beroa xurgatzen du. Zerbitzariak berotu ahala, likidoak fase-aldaketa jasango du lurrin bihurtuz eta beroa gehienetan kondentsadore baten laguntzaz kanporatuko da. Horretarako likido dielektrikoek propietate termodinamiko onak dauzkate eta isolatzaile elektriko onak dira, elementu elektronikoekin kontaktua ziurtatzeko. Murgiltze bidezko hozteak aukera ematen die operadoreei energiaren kontsumoa nabarmen murrizteko, klimatizazio-azpiegitura tradizionala ekiditen baitu. Sistema honekin, hozte-prozesuan % 90-eko kontsumo-murrizketa lor daiteke, eta datu-zentroaren kontsumo osoan % 40-ko murrizketa (Carrillo Martínez-Feduchi, 2019).

Hozte-teknologia hau ere, gero eta gehiago erabiltzen da merkatuan indarra hartzen hasi diren auto elektriko-

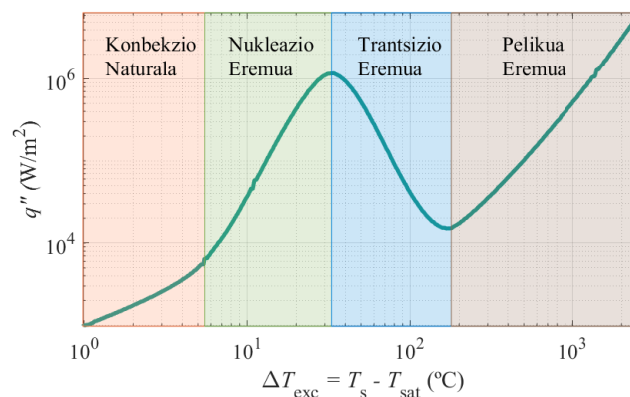
tan. Auto hauetako elementu garrantzitsueneko bat bateria da, autonomian eragin zuzena baitauka. Tenperaturak mugetatik haratago badaude, baterietan karga-deskarga prozesuak azeleratzen dira, biltegitratzeko ahalmena, bizitza erabilgarria eta autonomia gutxituz. Beraz, aplikazio hauetan hozte-sistemaren helburu nagusia zeldak tenperatura egokian mantentzea da, efizientzia eta segurtasuna bermatuz.

Oro har, sistema bateko tenperaturak ezarritako mugak gaintuz gero, osagaien akatsak edo hausturak sor daitezke. Beraz, hozte-sistema egokiak segurtasuna hobetu, osagaien bizitza erabilgarria luzatu, eta prozesuaren eraginkortasuna handitzen du. Hortaz, murgiltze bidezko hoztea etorkizun handiko teknika da industrian, ohiko aire bidezko hoztearen aldean, likidoaren fase-aldaketa dela eta bero-fluxu handiagoak, homogeneizazio termiko hobe eta erantzun azkarragoa ahalbidetzen baititu. Hala ere, teknologia hau garapen fasean dago, izan ere, likidoaren fase-aldaketan parte hartzen duten fenomenoak aztertu behar dira, bero-transferentzia desorekatuak saihesteko eta geometria eraginkorrek ebaluatzen eta garatzeko.

Hori horrela, murgiltze hozketan oinarritzen den sistemetako bat *pool boiling* bezala ezagutzen dena da, non parte hartzen duten mekanismo fisikoak fluido estazionarioei dagozkienak diren. Bertan, fluidoari ez zaio mugimendurik inposatzen, beraz prozesuan sortutako edozein mugimendu konbekzio naturalaren korrantei eta burbuielen mugimenduaren ondorio da. Hala, irakitean sortzen den bero-transferentzia gehienbat likidoak jasaten duen fase-aldaketaren ondorioa da, likidotik lurrunera bihurtzen baita. Fase-aldaketa hau, kanpotik berotutako gainazal batek eragiten du, non bere tenperatura likidoaren saturazio tenperatura baino handiagoa izango den presio horretarako. Beraz, bero-transferentzia fluidoaren propietate termo fisikoaren eta gainazalaren propietateen arabera izango da.

Pool boiling motako sistema bateko bero-transferentzia aztertzeko lehen lana Nukiyama-k (1934) egin zuen. Bere esperimentuan, ura presio atmosferikoan erabiliz, kobrezko barra bat berotu zuen, eta burbuilek gainazalean duten bilakaerari erreparatu zion. Horrekin, irakite prozesuan dagoen uraren portaera aztertzen duen diagrama sortu zuen (1 irudia). Diagrama horretan, bero-fluxuaren eta gehiegizko tenperaturaren (berotutako gainazalaren tenperaturaren eta saturazio tenperaturaren arteko diferentzia) eboluzioa errepresentatu zuen, *pool boiling* kurba bezala ezagutzen dena. Lortutako datuak aztertuz, irakite prozesuak gehiegizko tenperaturaren arabera forma desberdinak hartzen dituela ohartu zen, kurba lau ataletan banatuz: konbekzio naturala, nukleazio eremua, trantsizio eremua eta pelikula bidezko bero-transferentzia. Orduetik egindako ikerketek egiaztatu dute nahiz eta aztertutako likidoa aldatu, kurbaren forma orokorra eta atal bakoitzean garrantzia duten bero-transferentziako mekanismoak mantentzen direla.

1. Irudia: Nukiyama-k (1934) eskuratutako *pool boiling* kurba ur destilatuen kasuan presio atmosferikoak



Aipatu beharra dago nukleazioko eremua dela praktikan desiragarriena, izan ere, bero-transferentzia handiak lor daitezke gehiegizko tenperaturaren balio baxuentzako. Tenperaturaren gehikuntza txiki batekin, bero-fluxua nabarmen handitzen da, eta hori 1 irudian ikus daiteke, eremu honetako malda handiagoa baita.

Burbuilen dinamikari dagokionez, analisi optikotik ondorioztatu da konbekzio naturalean ez dagoela burbularik, likidoaren fase-aldaketa nukleazio eremuan hasten baita. Bigarren atal honetan burbuila isolatuak sortzen hasten dira eta gehiegizko tenperatura handitzen den heinean, burbuilak abiadura handiagoz sortzen dira lurruntutabeak hasten direlarik. Azkeneko ataletan ordea, gainazaleko tenperatura handien ondorioz, gainazalean lurrunezko geruzak sortzen hasten dira, bero-transferentziaren ikuspuntutik oztopo bat izanik.

2 Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Gaur egun *pool boiling* bidezko hozte-sistemak duen interes handia dela eta, hainbat ikerketa daude atal teorikoa, esperimentala eta numerikoa aztertzen dutenak. Horietan, laneko kondizioen, fluido motaren eta gainazalaren ezaugarrien eragina aztertzen da besteak beste. Horietatik, gaur egun interes handieneko alderdiak *pool boiling* kurben karakterizazioa eta burbuilen portaera deskribatzen duten parametroak dira.

Gainazal akaberari dagokionez, honen zimurtasuna handituz gero, bero-fluxua handitu egiten da irakite-eremu nuklearrerako. Hau ikus daiteke esaterako, Suszko eta El-Genk-ek (2015), eta Nishio eta Chandratilleke-k (1989) egindako ikerketetan. Gainazala geroz eta zimurragoa denean, zulo gehiago dauzka, beraz, burbuilak sortzeko leku gehiago eta handiagoak edukiko ditu. Ondorioz, gainazal zimur batean nukleazio guneen dentsitatea handiagoa da gainazal leun batekin alderatuz, eta horrekin bero-transferentzia ere handiagoa da. Hala ere, kontuan izan behar da, irakite prozesuak aurrera egin ahala, gainazalean lurrun geruza bat sortzen denez, zimurtasunaren eragina murriztu egiten dela. Beraz, gainazalaren ezaugarri honek sortzen duen hobekuntza bero-transferentzian ez da iturri egonkorra irakite-prozesu luze batean.

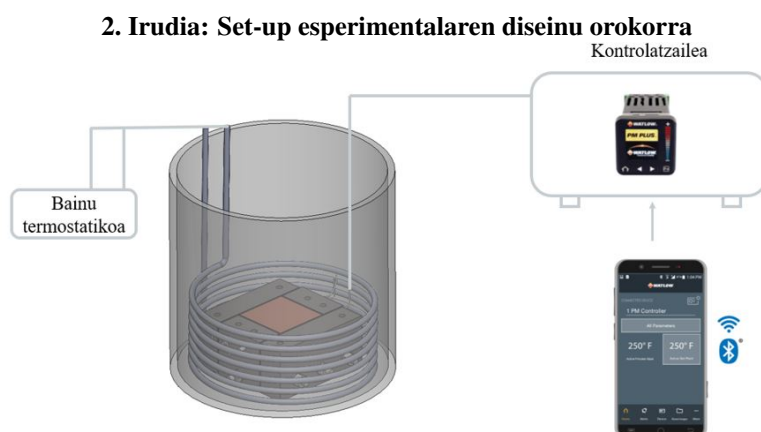
Horrekin batera, berrotutako gainazalaren inklinazioa ere sakon aztertu den alderdi bat da, izan ere, hainbat sistema portatiletan prozesuan zehar gainazalaren posizio aldakorra izan daiteke. Wang et al. autoreek (2021) ondorioztatu zuten, gainazal plano batean, inklinazioa 90° baino handiagoa denean, burbuilen tamaina handitzen doala angelua handitzen doan heinean. Aldiz, burbuilen frekuentzia eta bero-fluxu maximoaren balioa txikitzen dira. Kang-ek (2018) ordea, gainazalaren geometria tuboetara aldatuz, ondorioztatu zuen inklinazio angeluaren eragina tuboaren luzeraren eta diametroaren erlazioaren (L/D) araberakoa dela.

Burbuilen eboluzioa deskribatzeko ordea, lehendabizi burbuilen irteerako diametroa aztertzen da, non burbuilak gainazaletik askatzen direnean daukaten tamainari erreferentzia egiten dion. Irteerako frekuentziak ordea, nukleazio leku batetik denbora jakin batean askatzen diren burbuilen kopurua adierazten du. Aldiz, nukleazio dentsitateak, irakite-gainazaleko burbuilak sortzen diren guneei egiten die erreferentzia. Hiru aldagai horiek funtsezkoak izango dira bero-transferentzia deskribatzen duten ereduak garatzeko, bero-fluxuan eragin zuzena baitute. Gehienetan, atal esperimentalean, parametro horien neurketa analisi optiko bidez egiten da abiadura altuko kamerak erabilita (Arenales et al., 2020; Ayoobi et al., 2019; Calati et al., 2021; Suszko eta El-Genk, 2015; McHale eta Garimella, 2010).

Beraz, ikerketa honen helburu nagusia *pool boiling* kurbak era esperimentalean karakterizatzea da, horretarako kobrezko gainazal leundua presio atmosferikoan ikertuz. Ikerketa honetan fluido dielektrikoen portaera aztertzeko set-up esperimentala eta neurketetan jarraitu beharreko prozesua definitu dira. Sistema balidatze aldera, lehen entseguak urarekin egin dira. Behin balidazioa egin denean aldiz, Novec - 7000 likido dielektrikoa aztertu da.

3 Ikerketaren muina

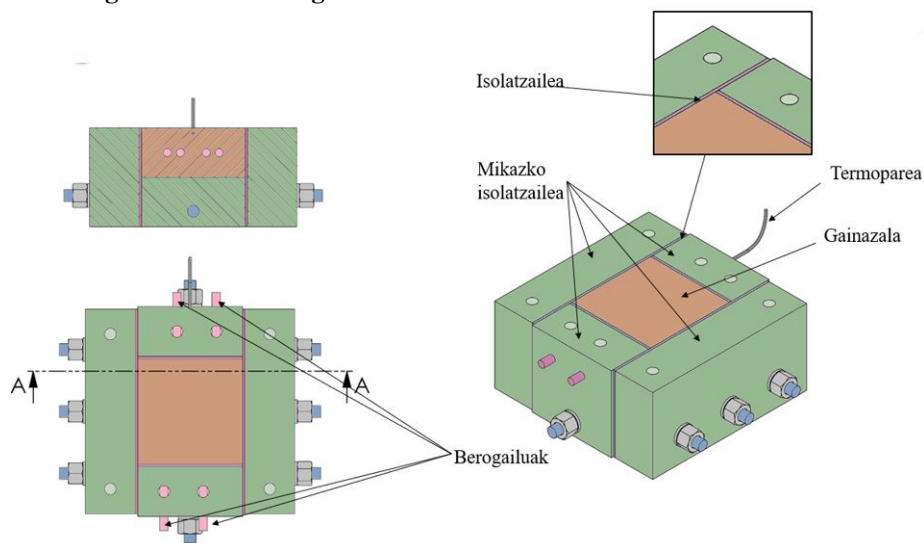
Set-up esperimentala hiru atal nagusitan banatzen da (2 irudia): likidoaren tenperaturaren kontrola edukitzeko bainu termostatikoa eta serpentina, berotze sistema duen aztertu beharreko gainazala eta kontrolarekin batera datuak eskuratzeko sistema.



Temperaturaren kontrola, ontzira moldatutako serpentina bati kontaktatuta dagoen bainu termostatiko baten bidez egin da (2 irudia). Bainu termostatikoak ura serpentinatik tenperatura jakin batean zirkularazten du, eta serpentina aztertu nahi den likidoarekin kontaktuan dagoenez, haren tenperatura kontrolatzen du. Hala ere, kontrola behar bezala egin dela ziurtatzeko, termopare bat sartu da likidoan.

Berotze sistema (3 irudia), horretarako prestatuta dagoen ontzi batean barruan dago, aztertu nahi den likidoan erabat murgilduta. Beroa trukatu duen gainazala, kobrezko piezaren goiko alde da (40 mm x 40 mm). Bero-iturri gisa, kobrezko piezan alboetatik lau berogailu txertatu dira, potentzia totala 300 W-takoa delarik. Hauen helburua, laginaren gainazala berotzea da. Horretarako, potentzia edo gainazal tenperatura jakin bat inposatu duen kontrolatzailea erabili da, erabiltzaileak kontrolatuko duena. Era berean, berogailuek igortzen duten bero gehiena gainazalera transferituko dela ziurtatzeko, mikazko isolatzaileak jarri dira laginaren alboetan eta behealdean. Bestalde, mikazko piezen eta kobrezko piezaren arteko kontaktua ziurtzeko, isolatzaile diren laminak erabili dira. Azkenik, gainazalako tenperatura neurtzeko, kobrezko piezaren goiko aldetik 2 mm-tara (gainazaletik ahalik eta gertuen), termopare bat jarri da, piezaren erdiko tenperatura neurtuz.

3. Irudia: Sistema esperimentaleko berotze sistemaren atalak: isolatzailea, mikazko isolatzailea, termoparea, aztertuko den gainazala eta berogailuak



Prozedura esperimentalak hiru zatitan banatzen dira: aurreprozesamendua, saiakuntza eta post-prozesua. Neurketak baldintza beretan egin direla ziurtatzeko, oso garrantzitsua da aurreprozesamenduan definitutako urratsak jarraitzea.

Aurreprozesamenduan, aurrez leundua izan den gainazala aztertu nahi den tenperaturara egonkortu den likidoan murgiltzen da. Behin tenperatura egonkortuta, datuen erregistroa abiarazten da. Entseguan zehar berogailuen potentzia pixkanaka handitzen da balio bakoitzarentzat 3-4 minutuko egonkortze denbora utziaz. Sekuentzia hori potentzia maximora iritsi arte errepikatzen da.

Behin datuen bilketa amaitzean, post-prozesuan, *pool boiling*-eko kurbak lortzeko helburuarekin, berogailuek igorritako potentzia eta aztertutako gainazalaren azalera kontuan hartuta, potentzia bakoitzeko bero-fluxua kalkulatu da. Hori horrela, bero-fluxua eta gehiegizko tenperatura konparatu dira *pool boiling* kurbak lortuz.

Lortutako datu esperimentalen balidazioari dagokionez, lehendabizi, konbektzio naturalen bidezko bero-transferentzia balidatzeko, honen adierazpen teorikoak erabili dira (Cengel, 2002). Horretarako, fluidoaren tenperatura jakin batentzat, gainazalaren tenperatura bakoitzean konbektzio naturalaren bidezko bero-fluxua kalkulatu da.

Nukleazioko atalaren balidazioari dagokionez, bibliografian dauden korrelazio ugarien ondorioz, zaila da egoera jakin batera hobekien egokitzen den eredu edo korrelazioa zehaztea. Azterketa honetarako Rohsenow-en (1951) korrelazioa hautatu da (1 ekuazioa), non korrelazio hori garatzeko, *pool boiling* prozesuari lotuta dagoen bero-transferentzian eragina duten mekanismoak aztertu zituen. Beraz, korrelazioa fluidoaren propietateen, gainazalaren materialaren eta bere zimurtasunaren menpekoa da.

$$q''_s = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[\frac{C_{pl}(T_s - T_{sat})}{C_{sf} h_{fg} Pr_l^n} \right]^3, \quad (1)$$

non, μ_l likidoaren biskositate dinamikoa den, h_{fg} lurruntze entalpia, g grabitatearen azelerazioa, ρ_l likidoaren dentsitatea, ρ_v lurrunaren dentsitatea, σ gainazal tentsioa, T_{sat} fluidoaren saturazio temperatura, C_{pl} fluidoaren bero espezifikoa, C_{sf} eta n konstante esperimentalak, T_s eta T_∞ gainazalaren eta fluidoaren tenperaturak diren hurrenez hurren. Propietate guztiak likidoarenak dira, lurrunaren dentsitatea eta konstante esperimentalak izan ezik, eta saturazio tenperaturan ebaluatzen dira. Beraz, korrelazio honek nukleazio eremuan ez du likidoaren temperatura kontuan hartzen, saturazio tenperaturan dagoela onartzen baitu.

Bestalde, bero-fluxu maximoa teorikoki kalkulatu da. *Pool boiling* kurban nukleazioko eremua amaitu eta trantsizio-eremua hastean, bero-fluxua bere balio maximora iristen da. S.S. Kutateladze-k Errusian (1948), eta N. Zuber-k Estatu Batuetan (1958) teorikoki zehaztu zuten bero-fluxu maximoa *pool boiling* motako sistema baten zat. Beraz, Cengel-k (2002) jasotako adierazpena erabili da.

Azkenik, lortutako datu esperimentalak, bibliografiako datu esperimentalekin alderatu dira. Horretarako, kasuan kasuko, ziurtatu da bibliografiako neurketak baldintza berdinean egin direla, izan ere, ikusi da entseguko baldintzek eragin zuzena daukatela lortutako kurbetan.

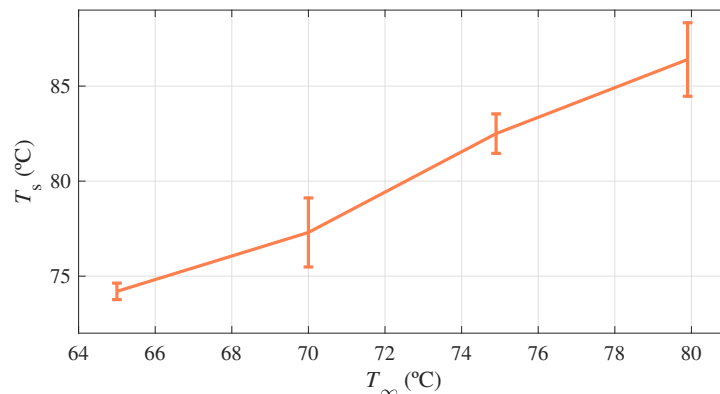
3.1 Emaitzak

Atal honetan, ur destilatuarekin eta Novec-7000 likido dielektrikoarekin egindako probetatik lortutako neurketak eta *pool boiling* kurbak ageri dira. Proba guztiak aurretik deskribatutako sistemaren eta prozeduraren bitartez egin dira, lagin guztiak kondizio berdinetan aztertu direla bermatuz.

Lehendabizi, konbekzio naturalaren eremua aztertu da berotze potentzia baxuak aplikatuz, erabilitako sistema denbora jakin batean fluidoaren temperatura mantendu eta kontrolatzeko gai dela egiaztatzeko. Neurketak kobrezko gainazal leunduarekin egin dira, ur destilatua erabiliz presio atmosferikoan. Hala, berogailuen potentzia konstante mantenduz (15 W), fluidoaren temperatura, bainu termostatikoaren laguntzaz, 79,9 °C-tik 65 °C-ra jaitsi da pixkanaka. Uraren temperatura murriztean, eta 3-4 minutuz konstante mantentzen dela egiaztatzean, laginaren gainazaleko temperatura erregistratu da kasu bakoitzean. Datuak erregistratu ondoren, aurrez deskribatutako konbekzio naturalaren ekuazioen bidez lortutako datu teorikoekin alderatu dira.

4 irudian ikus daitekeenez, datu esperimentalak teorikoetara hurbiltzen dira, bien arteko errorea ez baita % 2-a baino handiagoa. Beraz, bainu termostatikoaren eta serpentinarene bidez, sistema gai da fluidoaren tenperaturaren kontrola mantentzeko. Hala, likidoaren azpizhozteak *pool boiling* prozesuan duen eragina aztertzeko aukera eskaintzen du erabilitako sistemak.

4. Irudia: Neurketan lortutako datu T_s datu esperimentalak ur-destilatua erabiliz, presio atmosferikoan eta fluidoaren temperatura kontrolatuz berogailuak 15 W-ko potentzia dutelarik. Bertan datu teorikoekin daukaten errorea



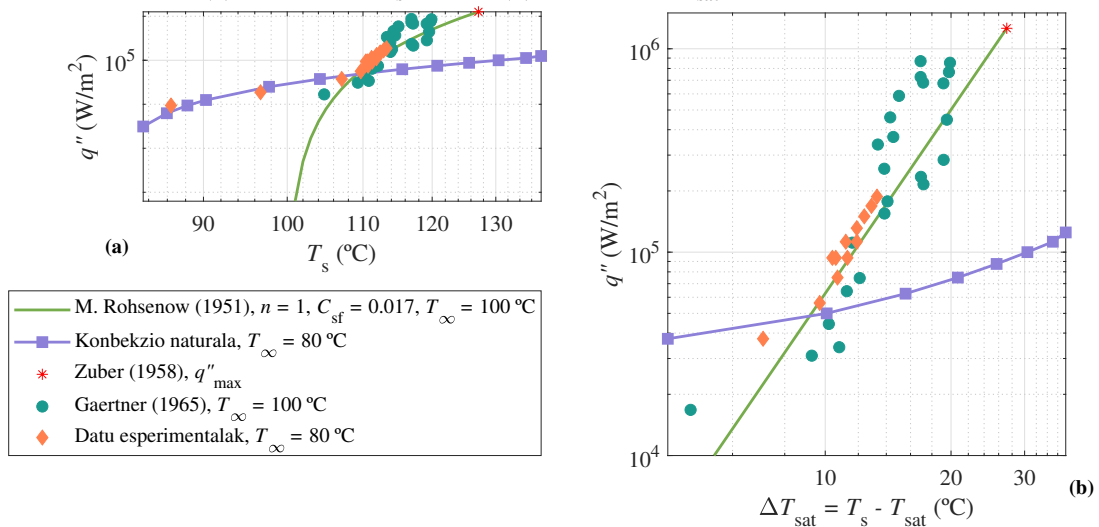
Bigarren proban, ur destilatuari dagokion *pool boiling* kurba lortu da. Horretarako, aurreko kasuan bezala

kobrezko gainazal horizontal leundua erabili da presio atmosferikoan. Neurketan uraren temperatura saturazio tenperaturatik behera mantendu da ($\Delta T_{\text{sub}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_\infty = 80 \text{ }^\circ\text{C}$). Neurketak Gaertner-en (1965) datu esperimentalekin alderatu dira, presio atmosferikoan eta ur destilatuekin, kobrezko gainazal leun baterako *pool boiling* kurba era esperimentalean lortu baitzuen. Autore hori hautatu da neurketak baldintza beretan egin zituelako, fluidoaren temperatura izan ezik, haren probetan fluido saturazio tenperaturan mantentzen baitzuen.

Hori horrela, 5 irudian neurketatik lortutako *pool boiling* kurbak ageri dira. Konbekzio naturalari dagokion eremuan ($T_s < 105 \text{ }^\circ\text{C}$) lortutako datu esperimentalak datu teorikoekin bat datozela ikus daiteke, zona hori balidatuz.

Rohsenow-en (1951) korrelazioa eta konbekzio naturalaren kurba teorikoa gurutzatzen direnean nukleazioko eremua hasten da. Hau da, hortik aurrera burbuilak gainazalean sortzen hasten dira. Fase-aldaketa hasten da, eta ondorioz nabarmen handitzen da bero-fluxua gainazaleko tenperaturaren gehikuntza txiki batekin. Hori horrela, nukleazioko eremua hasi eta bero-fluxu maximoa lortu arte, Rohsenow-en (1951) korrelazioa erabili da balidaziorako. Korrelazioko koefiziente esperimentalak doitzera, ura fluido gisa edukitzeagatik 1 balioa esleitu zaio n koefizienteari eta 0,0017 balioa C_{sf} -ri, gainazala leunduta baitago (Cengel, 2002). Hala, korrelazioa doitu ondoren, ikusten da egindako neurketak bat datozela korrelazio horrek aurreikusten dituen datuekin.

5. Irudia: Neurketatik eskuratutako *pool boiling* kurbak ur destilatua erabiliz, gainazal leun horizontalean presio atmosferikoan. (a) Bero-fluxua T_s -rekiko. (b) Bero-fluxua T_{sat} -rekiko



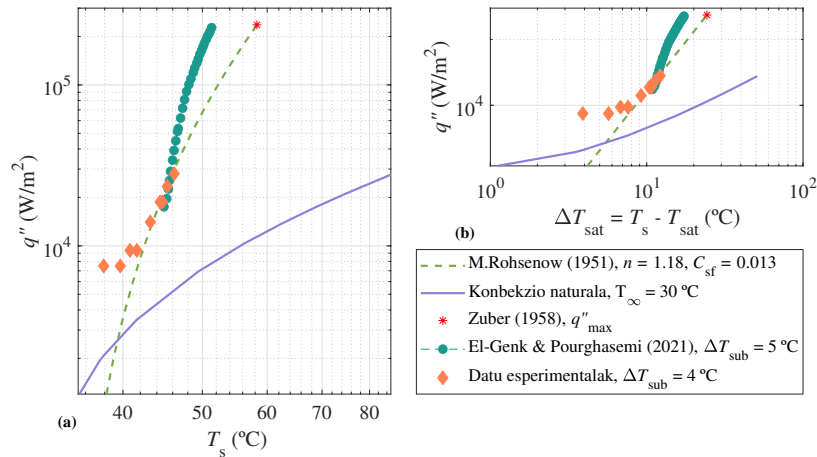
Horrekin batera, eta kontuan izanda Gaertner-en (1965) datuak nukleazioko eremukoak direla, egiaztatu da egindako neurketekin lortutako datuak bat datozela. Beraz, ondorioa da deskribatutako kondizioetan, neurketak egiteko proposatu den sistema gai dela *pool boiling* kurbak modu fidagarrian eskuratzeko, teoriarekin eta bibliografiako datuekin bat datoz eta.

Azkenik, *pool boiling* kurbak lortu dira Novec-7000 fluido dielektrikoarentzat $30 \text{ }^\circ\text{C}$ -tan, presio atmosferikoan eta kobrezko gainazal horizontal leundua erabiliz (6 irudian). Kasu honetan, eta fluidoaren asetasun-temperatura baxua den presio atmosferikoan ($T_{\text{sat}} = 34 \text{ }^\circ\text{C}$), potentzia baxuak behar dira ($12 - 45 \text{ W}$) *pool boiling* kurbak lortzeko. Hori bereziki kritikoa izango da konbekzio naturaleko eremuan, berogailuen potentzia ez baita 16 W baino handiagoa eta tarte hauetan ezin da kontrola zehaztasunez egingo denik ziurtatu. Izan ere, bero-galerak direla eta, ezin da bermatu berogailuek igortzen duten potentzia guztia kondukzio bidez kobrezko piezaren gainazalera transmititzen denik. Hori 6 irudian ikus daiteke, konbekzio naturalaren eremuan ($T_s < 41 \text{ }^\circ\text{C}$) datu esperimentalak teorikoen gaintetik baitaude. Hau da, konbekzio naturalaren teoriari jarraituz, neurketetan lortu diren T_s -ren balioak lortzeko, sartu dena baino potentzia baxuagoak beharko liriteke. Beraz, eremu honetan lortutako datuak ez dira fidagarriak kontsideratzen.

Bestalde, egindako neurketetatik ateratako datuak El-Genk eta Pourghasemi-ren (2021) datu esperimentalekin alderatu dira. Likido azpihoztuak duen eragina aztertu zuten, horretarako, $0 \text{ }^\circ\text{C}$ -ko azpihoztetik hasi (likidoa saturazio tenperaturan) eta $15 \text{ }^\circ\text{C}$ -ko azpihozte arte, nukleazioko eremuan. Horretarako, HFE-7000 (edo Novec - 7000) likido dielektrikoa erabili zuten $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ -ko kobrezko gainazal batean. Amaitzeko, aurreko kasuan bezala,

Rohsenow-en (1951) korrelazioa ere erabili da. Hala, 6 irudian ikus daitezkeen bezala, neurketetako datuak bat datoz korrelazioarekin eta bibliografiako datuekin. Beraz, likido dielektrikoarentzat *pool boiling* kurba balidatzea lortu da nukleazio eremuan, presio atmosferikoan eta 4 °C-ko azpihoztearekin.

6. Irudia: Neurketatik eskuratutako *pool boiling* kurbak Novec - 7000 likido dielektrikoa erabiliz, gainazal leun horizontalean presio atmosferikoan. (a) Bero-fluxua gainazaleko temperaturarekiko. (b) Bero-fluxua gehiegizko te



4 Ondorioak

Laburbilduz, eta lortutako emaitzetan oinarrituta, ur destilatuaren kasurako, erabilitako prozedimendua eta sistema balidatu dira *pool boiling* kurbak era fidagarrian lortu direla bermatuz, bai konbektzio naturaleko eremuan eta bai nukleazio eremuan.

Uraren kasuan, *pool boiling* kurbak aztertu dira presio atmosferikoan, 20 °C-ko azpihoztearekin eta gainazal leunarekin, bibliografian deskribatutako pareko portaera lortuz. Halaber, likido dielektrikoarentzat nukleazio eremuan lortutako datuak fidagarriak direla egiaztatu da. Aldiz, ikusi da sistemak mugak dituela presio atmosferikoan asetasun-tenperatura baxuko likidoak (Novec - 7000) konbektzio naturalaren eremuan zehaztasunez aztertze-ko. Dirudenez, gainazalak transmititu beharreko potentzia baxua izanik, gainontzeko aurpegieta dauden galera txikiek emaitzetan errore nabarmena sortzen baitute. Hori dela eta, aztertu nahi den fluido motaren edo potentzia tarteen arabera egungo sistemaren mugak zein diren zehaztu dira. Honi esker, epe motzera begira, entseguak erre onargarriak izango dituzten baldintzetan egin ahal izango dira, eta epe luzera begira aldiz, hobetu beharreko ezaugarriak identifikatuko dira entsegu baldintzen tartea oraindik ere gehiago zabaldu ahal izateko.

Orotara, *pool boiling* fenomeno konplexua nahi den baldintzetan entseatzeko baliabide esperimentalak karakterizatu eta datuen analisi metodologia balioztatu dira lan honekin. Horrela, beste lan baldintza zein fluidoaren portaera aztertu ahalko da alor honetan ezagutza berria sortuz.

5 Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Egindako lanetik eta ikusita gaur egun interes berezia daukan teknologia dela etorkizunerako hainbat erronka proposatzen dira. Lehendabizi, epe laburrera begira, gainazalaren zimurtasunak bero-transferentzian duen eragina aztertzea proposatzen da. Horretarako material berdineko baina zimurtasun desberdineko laginen *pool boiling* kurbak eskuratuz eta bertatik bero-fluxuaren eboluzioa aztertuz. Hala, etorkizuneko geometriek eduki beharreko gainazal akabera optimoa aurreikusi daiteke.

Bestalde, burbuilen eboluzioa aztertze-ko, neurketa esperimentaletan analisi optikoa egitea proposatzen da, horretarako entsegu bankua moldatuz eta abiadura handiko kamera erabiliz. Izan ere, irudien post-prozesuan, diametroa, frekuentzia eta nukleazio dentsitateak aztertuz, egoera konkretu horretan parametro horiek deskribatzen dituen adierazpenak lor daitezke. Era honetan, fenomeno konplexu hau era zehatzago batean karakterizatzea lortuko da.

Erreferentziak

- Arenales, M. R. M., Sujith, S. K., Kuo, L. S., & Chen, P. H. (2020). Surface roughness variation effects on copper tubes in pool boiling of water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 151.
- Ayoobi, A., Khorasani, A. F., Tavakoli, M. R., & Salimpour, M. R. (2019). Experimental study of the time period of continued heating rate on the pool boiling characteristics of saturated water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137:318–327.
- Calati, M., Righetti, G., Doretto, L., Zilio, C., Longo, G. A., Hooman, K., & Mancin, S. (2021). Water pool boiling in metal foams: From experimental results to a generalized model based on artificial neural network. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 176.
- Carrillo Martínez-Feduchi, G. (2019). Data center dynamics. *Refrigeración por Inmersión: ¿El futuro de los Centros de Datos?*
- Cengel, Y. (2002). *Heat Transfer: A Practical Approach*. McGraw-Hill, 2 edition.
- El-Genk, M. S. & Pourghasemi, M. (2021). Subcooled boiling critical heat flux of hfe-7000 dielectric liquid on inclined rough cu. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 175.
- Gaertner, R. F. (1965). Photographic study of feiate pool boiling on a horizontal surface.
- Kang, M. G. (2018). Effects of inclination angle on pool boiling heat transfer of near horizontal tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 97:375–380.
- McHale, J. P. & Garimella, S. V. (2010). Bubble nucleation characteristics in pool boiling of a wetting liquid on smooth and rough surfaces. *International Journal of Multiphase Flow*, 36:249–260.
- Nishio, S. & Chandratilleke, G. (1989). Steady-state pool boiling heat transfer to saturated liquid helium at atmospheric pressure.
- Nukiyama, S. (1934). The maximum and minimum values of the heat q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure. *Heat Mass Transfer*, 27:959–970.
- Rohsenow, W. M. (1951). A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids.
- Suszko, A. & El-Genk, M. S. (2015). Saturation boiling of pf-5060 on rough cu surfaces: Bubbles transient growth, departure diameter and detachment frequency. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91:363–373.
- Wang, C., Li, P., Zhang, D., Tian, W., Qiu, S., Su, G. H., & Deng, J. (2021). Experimental study on the influence of heating surface inclination angle on heat transfer and chf performance for pool boiling. *Nuclear Engineering and Technology*.

6 Eskerrak eta oharrak

Egileek aitortzen dute Eusko Jaurlaritzaren BAT4ME (Elkartek 2023 programa), Gipuzkoako Foru Aldundiaren Hoztikor proiektuaren (2022-CIEN-000052-01) eta Ikerketa Taldearen IT1505-22 Programaren laguntza ekonomikoa.