

Gradu Amaierako Lana
Ingeniaritza Kimikoko Gradua

Iturri bilgailudun iturri ohantze konikoen ikerketa hidrodinamikoa material ezberdinen tratamendurako

Egilea:
Cristina Saceda Martín
Zuzendaria:
Haritz Altzibar Manterola

AURKIBIDEA

LABURPENA	III
1. SARRERA	1
1.1. ITURRI OHANTZE TEKNOLOGIAREN GARAPENA	1
1.2. ITURRI OHANTZEAREN EZAUGARRIAK	2
1.3. ITURRI OHANTZEAREN ABANTAILAK ETA MUGAK	3
1.4. ITURRI OHANTZEAREN ERABILERAK	4
1.5. ITURRI OHANTZE KONIKOA	4
1.6. ITURRI OHANTZEAREN BARNE GAILUAK	7
1.6.1. Barne hodia	7
1.6.2. Iturri bilgailua	9
1.7. ARRASTEIA ITURRI OHANTZEAN	11
2. HELBURUAK	12
3. ESPERIMENTALA	13
3.1. EKIPOAREN DESKRIBAPENA	13
3.2. BALDINTZA ESPERIMENTALAK	16
3.3. KARGA GALERAREN NEURKETA	18
3.4. MATERIALEN KARAKTERIZAZIOA	19
3.4.1. Beirazko bolak	20
3.4.2. Zerrautsa	20
3.4.3. Ogi arrailatua	21
4. EMAITZAK	23
4.1. ARRASTE AZTERKETA KUANTITATIBOA	23
4.2. PARTIKULA FINEN ARRASTEAREN EBOLUZIOA DENBORAREKIN	27
4.3. MATERIAL FIN EZBERDINEN ARRASTEAREN KONPARAKETA	30
5. ONDORIOAK	35
6. NOMENKLATURA	38

7. BIBLIOGRAFIA

LABURPENA

Lan honen helburua, barne gailu ezberdinak dituen konfigurazio ezberdinetako iturri ohantze konikoen portaera hidrodinamikoaren azterketa burutzea da. Iturri bilgailua izeneko gailuak, iturkuntzarako zailak diren materialekin operazio egonkorra ahalbidetzen du, eta arrastearen ondorioz ematen den ohantzeko partikula finen galera ekiditen du. Lan honetan partikula irregularren portaera ikertu nahi denez, saiakuntzetan erabilitako materiala partikula fin moduan zerrautsa izan da. Zerrautsaz gain, beirazko bolak erabili dira partikula lodi moduan.

Ikerketa honetan, konfigurazio ezberdinak erabiliz (erdiko hodi ezberdinak eta erdiko hodirik gabe) ematen den partikula finen arrastea aztertu da. Azterketa hau, partikula lodi eta finen nahasteekin lan egitean, operazioko aire emari altuengatik ohantzea osatzen duten partikulak arrastatuak izaten direlako burutu da. Honek, garrantzi handia du batez ere arrastatu edo galtzen diren partikulak, katalizatzaileak bezalako material garestiak direnean.

Horretarako, ikerketa taldean diseinatu eta patentatu den iturri bilgailua erabiliz eta gailurik gabe esperimenduak egin dira, haien arteko konparaketa burutuz. Iturri bilgailua erabiliz, finen arrastea ekiditeaz gain, iturria egonkortzen da, gas-solido ukipena areagotuz eta hortaz, materia transferentzia hobetuz.

Honetaz gain, barne hodi ezberdineko (hodi solidoa eta irekiduradun hodia) eta hodirik gabeko sistemak aztertu dira, sistema mota bakoitzak finen arrastearen nola eragiten duen ezagutzeko.

Arraste ikerketa hauetan, ondorengo aldagaiak neurtu dira: arraste portzentaia, operazio emari masikoa (Q), partikulek ziklo bat egiteko behar duten denbora maximoa (t_{cmax}), eta karga galera egonkorraren (ΔP).

Ondoren, arraste saiakuntzen eboluzioa aztertu da denborarekin, arrastea kualitatiboki aztertzeko. Azkenik, zerrautsa erabiliz lortutako arraste bilakaerak, ogi arrailatua erabiliz lortutakoekin konparatu dira. Horrela, arrastearen eragina sakonago aztertu da material ezberdinak erabiltzerakoan.

1. SARRERA

1.1. ITURRI OHANTZE TEKNOLOGIAREN GARAPENA

Hasiera batean, iturri ohantzea ohantze fluidizatuaren aldaera gisa kontsideratu zen, non sarreran gas banatzailea erabili beharrean, oinarri konikoaren erdian kokaturiko zulo bakarretik gas txorro bat injektatzen zen. Gaur egun, ordea, ohantze fluidizatuaren ezberdina den ukipen erregimen bezala kontsideratuta dago.

Iturkuntza hitza lehen aldiz aipatu zen fase diluituko kiskalketaren patente batean (Robinson, 1879). Bertan, ohantzearen hidrodinamikari buruz erreferentziarik ez zegoen, baina geroago iturkuntza bezala izendatu zen (Mathur eta Gishler, 1955a) fenomenoarekin zerikusia zuela badirudi.

Iturri ohantze teknologiaren aurkikuntza ustekabeko gertaera bat izan zen, bere jatorria Marthur eta Gishler ikertzaileek egindako gari aleen fluidizazioan dago. Ikerlari hauek ikusi zuten, prozesuan plaka banatzailearen zuloak estali eta gasa erdialdetik bakarrik sartzean partikulak ez zutela zorizko mugimendurik egiten ohantze fluidizatueta bezala, baizik eta partikula hauek mugimendu ziklikoak deskribatzen zituztela. Honen ondorioz, aleak hondatu gabe airearen tenperatura altuagoak erabili ahal ziren eta honek ohantze fluidizatuaren etekinaren hobetzea ekarri zuen (Gishler eta Marthur, 1957 a,b). Ondoren, teknika hau beste material batzuren tratamendurako ere erabili zuten, jariatzen bezala airea zein ura erabiliz.

1959an Levak iturri ohantzea teknika aurkeztu zuen “Fluidization” izeneko liburuan, iturri ohantzei buruzko lehen erreferentzia bibliografikoa izan zelarik. Bertan iturri ohantzearen aplikazioa arlo ezberdinetan interesgarria izan ahal zela aipatzen zen. Urte batzuk geroago, Zabrodskyk (1966) liburua argitaratu zuen. Ordurako, solidoaren eta gasaren fluxuen mekanismoak fluidizazioaren mekanismoen ezberdinak zirela frogatu zen. Aipatutako liburuaren arabera, teknikaren interesa batez ere partikula handiak tratatzeko ahalmenean zegoen, partikula txikien tratamenduan fluidizazioak zituen abantaila asko ere mantentzen zirelarik.

Geroago, Sobietar Errepublika Sozialisten Batasunean kontaktore konikodun iturri ohantzeak erabiliz ikerkuntzak hasi ziren, ordura arte erabiltzen ziren kontaktore zilindrikoak ordezkatzuz.

1962an Kanadan ezarri ziren iturri ohantze teknologiaren lehenengo unitate komertzialak ale eta landare produktuen lehorketarako, hala nola, dilistak, ilar haziak eta abar.

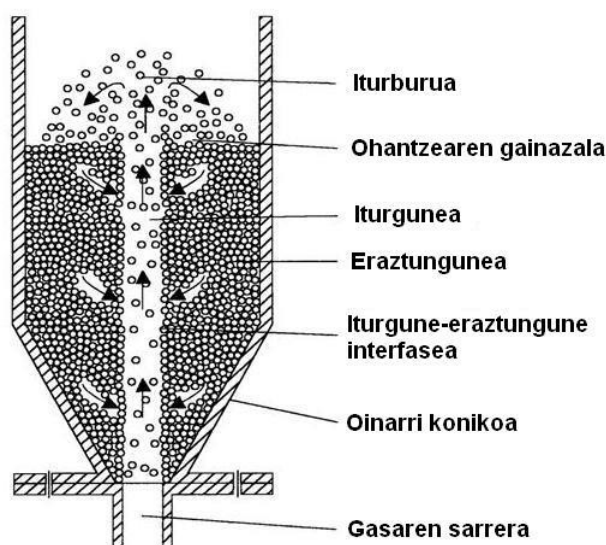
70ko eta 80ko hamarkadetan, erdiko hodien erabilpena eta iturri ohantzeen aplikazio espezifikoek garapena da aipagarriena. Gaur egun, geometria ezberdineko iturri ohantzeetara bideraturik dago ikerkuntza.

1.2. ITURRI OHANTZEAREN EZAUGARRIAK

Iturri ohantze baten ohiko geometria oinarri koniko (gune hilak ekiditen dira) eta sekzio zilindrikoa duen kontaktorea da.

Denboran zehar iturri ohantzeek hainbat aldaketa jasan dituzte, aipagarrienak ondorengoak izanik: ohantze ez oso sakonak erabiltzea (sekzio konikoaren eta zilindrikoaren bolumenak antzekoak izanik); oinarri laua erabiltzea; iturgunearen fluxua definitzeko erdiko hodiak erabiltzea; jariakina eraztungunetik sartzea (iturri ohantze fluidizatua) edo soilik geometria konikoa erabiltzea.

Ohiko geometriadun iturri ohantzearen ezaugarriak 1.1 Irudian ikus daitezke.



1.1. Irudia. Iturri ohantzearen ezaugarri esanguratsuenak.

Jariakina, normalean gasa, 1.1 Irudian ikusten den bezala kontaktorearen behealdearen erditik sartzen da eta ohantzea osoa zeharkatu ondoren goialdetik irteten da. Jariakinak abiadura minimo bat izan behar du ohantzeak sorturiko karga galerari aurre egiteko eta ohantzea apurtzeko, hori dela eta iturgunea deituriko hutsune zilindrikoa sortzen da. Iturgunea oinarritik gainazaleraingoa da irekita eta gasak bertatik partikula solidoak arrastatuko ditu. Bertan bi gune bereizten dira (Patrose eta Caram, 1984): alde batetik, gasaren sarrera gunea, non arraste indarrak grabitate indarrak baino handiagoak diren eta bestetik, gasa sartzen den tokitik gorago zentimetro gutxira dagoen gunea, non grabitate indarrek arraste indarrak berdintzen dituzten, ondorioz, partikulen dezelerazioa hasiz. Efektu hau, iturgunera sartzen diren partikulengatik eta gasa eraztungunerantz sakabanatzen delako gertatzen da.

Ondoren, arrastatuak izan diren partikulak iturritik irteten dira ohantzetik gora, iturburua osatuz. Bertan partikulak dezeleratu egiten dira beraien abiadura arraste abiaduraren berdina den arte, eta ondorioz, partikulen ibilbidearen aldaketa ematen da, ohantzearen gainazalera parabolikoki erortzen direlarik. Honela, partikulek gasaren norantza utzi egiten dute eta beheanzko ohantze mugikorra osatzen dute (ohantzea zeharkatzen duen gasarekin kontrakorronean). Partikulak eraztungunetik behera mugitzen dira iturrian berriro sartu arte, ziklo berri bat hasiz.

Beraz, sistemaren gunerik garrantzitsuenak iturria, iturburua, iturgunea eta eraztungunea direla ikusten da. Partikula guztiek ibilbide ziklikoa deskribatzen dute kontaktorearen barruan, nahiz eta partikula bakoitzak bide ezberdineko zikloak deskribatu. Aurretik aipatu bezala, partikulak iturburutik irten ondoren ohantzearen gainazalean sakabanatzen dira. Honen ondorioz, partikula batzuk kontaktorearen hormatik hurbilago eroriko dira eta beste batzuk berriz iturritik hurbilago, azken hauen zikloa besteena baino laburragoa izanik.

Operazio hau era jarraituan edo ez jarraituan eman daiteke. Era jarraituan operatzeko nahikoa da elikadura era jarraian sartzea (ohantzearen gainetik, eraztungunetik edota jariakinarekin batera), eta altuera jakinean solidoen irteera ezartzea, metaketarik ez gertatzeko.

Ohiko iturri ohantzeen kasuan ageri daitezkeen hainbat arazo konpontzeko zenbait aldaketa burutu dira, hala nola, barne hodiak gehitzea, iturriaren eta eraztungunearen artean, bi guneen arteko banaketa hobea lortzeko edota ohantze guztiz koniko edo guztiz zilindrikoen erabilera.

Azkenik, aipagarria da iturri ohantzeen operazioan mugimendu ziklikoari esker ukipen ona eta erregimen homogoneoa lortzen dela. Horregatik, partikulen tamainaren distribuzioa oso zabala denean edota $d_p > 1$ mm denean, iturri ohantzea erabiltzen da operazioaren ahalmena handitzeko.

1.3. ITURRI OHANTZEAREN ABANTAILAK ETA MUGAK

Teknologia guztiek bezala iturri ohantzeek zenbait abantaila eta desabantaila dituzte. Jarraian, iturri ohantzeek ohantze finko edo fluidizatuen aldean dituzten abantailak aditzera emango dira (Bridgwater, 1985; San José, 1991; Peñas, 1993; Llamosas, 1996):

- Iturri ohantzearen karga galera ohantze fluidizatuarena baino txikiagoa da. Hau, iturgunean sortutako indar bertikal baten ondorioz gertatzen da, zeinak eraztunguneko partikulak partzialki eusten dituen.
- Partikula handietarako ($\bar{d}_p > 500 \mu\text{m}$) gas-solido kontaktua hobea da iturri ohantzearen kasuan. Izan ere, gasaren zati batek eraztungunea zeharkatzen du eta iturritik gora doan gasak iturri-eraztungune interfaseko partikulak desplazatzen ditu, materia eta bero transferentzia hobetuz.
- Iturri ohantzea egokia da solido itsaskorren tratamendurako, porotasuna handitzean partikulen arteko eta kontaktorearen hormaren aurkako talken murrizketa ematen delako. Honela, partikulek energia zinetiko handiagoa dute, aglomerazioa eta fluidizazioaren galera ekidinez (Olazar eta kol., 2004).
- Ohantze fluidizatua ez bezala, iturri ohantzea oso egokia da tamaina ezberdineko solidoen tratamendurako, batez ere tamaina distribuzio diskretuetarako. Berez, iturri ohantzearen operazio abiadura partikula handien arraste abiaduraren gainetik dago, partikula guztien zirkulazioa ziklo osoak izatea ziurtatuz. Gainera, oinarri konikodun kontaktorearen diseinuak gune hilen agerpena saihesten du. Honek iturri ohantzean ohantze fluidizatuan baino partikulen banaketa txikiagoa agertzea dakar.
- Solido eta gasaren kontrakorronteko jarioak solidoaren tenperaturaren bat-bateko aldaketak ekiditen ditu, tenperaturarekiko sentikorrek diren materialen prozesatzea erraztuz (elikagaiak, produktu farmazeutikoak, material polimerikoak etab.), airea tenperatura altuagoan erabiltzea ahalbidetzen duelarik.

- Iturri ohantzeen eraikuntza erraza da, ez duelako plaka edo bestelako gas banatzailerik behar. sinpletasun honek iturri ohantzea aldakorra izatea egiten du eta bere eskala handitzea errazten du.
- Iturri ohantzea produktuen aleketarako gomendagarria da, gas-solido ukipen eraginkorra eta solidoaren ibilbide ziklikoen uniformetasunari esker. Gainera, iturri ohantzea egokia da trinkotasun eta esferikotasun handiko aleak eta prentsatzeko zailak diren materialen aleak lortzeko.
- Iturri ohantzearen erregimenak solidoaren elikadura jarraitua ahalbidetzen du, ohantze fluidizatuan ez bezala solidoa eraztungunean edo kontaktorearen oinarrian gasarekin batera sar baitaiteke.

Bestalde, esan beharra dago iturri ohantze teknikak 500 μm baino tamaina txikiagoko partikulekin lan egiteko zailtasunak izateaz gain, hurrengo mugak ere badituela (Passos, 1987a; Bridgwater, 1985):

- Karga galera handia dago iturgunearen hasieran.
- Kontaktorearen geometriak eta solidoaren ezaugarriak hainbat muga dituzte.

1.4. ITURRI OHANTZEAREN ERABILERA

Iturri ohantzeak erabilera asko eta oso ezberdinak ditu, bi talde nagusietan banatuko direnak; operazio fisikoak eta kimikoak.

Operazio fisikoen artean ondorengoak dira aipagarrienak: solidoen nahasketa, material solidoen estaltzea, aerosolen berreskurapena eta adsorbatzaileen birsortzea, birrinketa, ongarrien hoztea, ikatzaren aurreberoketa (kokizaziorako aurretratamendu bezala), pikortatzea (tamaina uniformedun eta esferikotasun oneko partikulak lortzeko) eta azkenik, material pikortsuen eta solido itsaskorren lehorketa (Pablos eta kol, 2017).

Operazio kimikoen artean aldiz, hurrengoak aipa daitezke: krakeo termikoa, plastikoen pirolisia (Santamaria eta kol, 2018), biomasaren konbustioa (Saldarriaga eta kol, 2018), klinker zementuaren produkzioa, ikatzen aktibazioa, ikatzaren gasifikazioa (Lopez eta kol, 2017; Cortazar eta kol, 2018), erregai nuklearretako partikulen estaltzea, burdin mineralen erredukzioa eta azkenik, pikortatze-erreakzioak, sistema berean ongarrien pikortatzea eta neutralizazioa baimenduz.

1.5. ITURRI OHANTZE KONIKOA

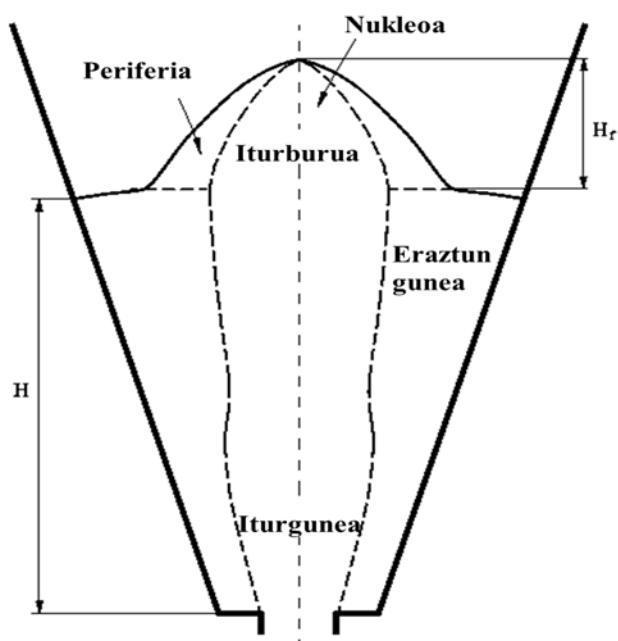
Geometria konikodun kontaktoreak geometria zilindrikoen ostean garatu ziren. Iturri ohantze konikoei kontaktore zilindrikoen ezaugarriak (partikula lodiekin operatzeko gaitasuna, karga galera txikia, mugimendu ziklikoa etab.) eta haien berezko geometriarekin datozen ezaugarriak biltzen dituzte, gas emari tarte handi batean operatzeko gaitasuna esaterako (Olazar eta kol., 1992; San José eta kol., 1993; Olazar eta kol., 1999). Konfigurazio honek gas emari tarte aldatzeko gaitasuna duenez partikula finekin, tamaina distribuzio zabaleko partikulekin eta partikula itsaskorrekin lan egitea ahalbidetzen du.

Honi guztiari esker iturri ohantze konikoa hainbat aplikaziorako sistema ezin hobea da: polimerizazio katalitikoa (Bilbao eta kol., 1987, 1989; Zabala, 1997), ikatz bituminosoen

gasifikazioa (Uemaki eta Mathur, 1976) eta solidoen kapsulatzea (Kucharski eta Kmiec, 1989), besteak beste.

Partikulak handiak, itsaskorrek edo tamaina banaketa dutenean, muga nabarmenak dituzte ohiko iturri ohantzeek operaziorako. Horrelako partikulekin modu egonkorrean lan egin daiteke iturri ohantze konikoetan, bi kontaktu erregimen ezberdin erabiliz, hots, ohiko iturri ohantzea eta iturri ohantze diluitua. Honi esker iturriaren blokeoak edo *slugging*-ak sortutako ohantzearen fluktuazioak ekidin ahal dira. Hortaz, kontaktore zilindrikoetan ez bezala, ez dago operatzeko ohantze altuera maximorik, nahiz eta fluidizazioa ekiditeko ohantze altuera minimo bat existitu (Olazar eta kol., 2004). Gainera, operazioa gasaren egoitza denbora baxuetan (milisegundoak) eman daiteke iturri ohantze diluitu erregimenean (Olazar eta kol., 1993; Olazar eta kol., 1997).

Ohantzea osatzen duten gunea iturria, iturburua, nukleoa, periferia, iturgunea eta eraztungunea dira. Orokorrean, ohiko iturri ohantzearen gunea bezala daude definituta eta 1.2 Irudian adierazten dira.



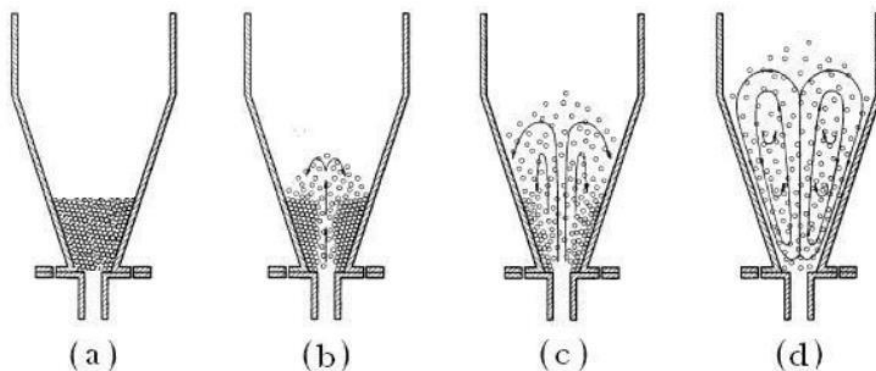
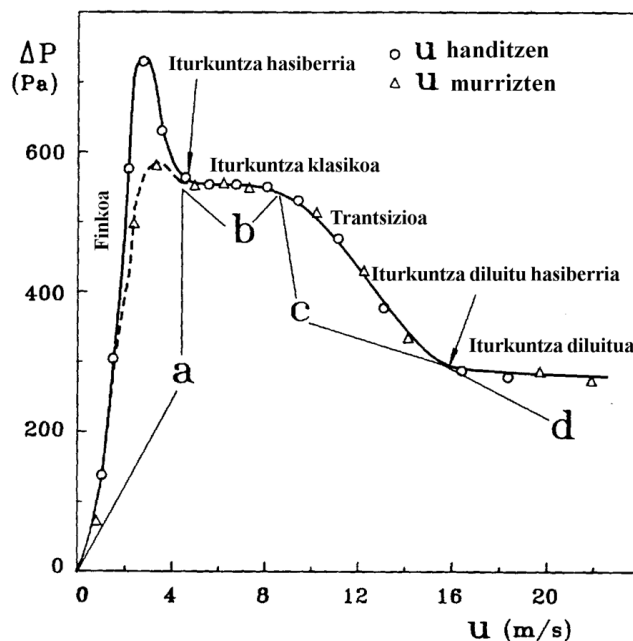
1.2. Irudia. Iturri ohantze konikoaren gune ezberdinak eta hauen arteko mugak.

Ohantzearen gune ezberdinen bolumena faktore geometrikoen (kontaktorearen angeluaren eta sarrerako diametroaren) eta baldintza esperimentalen (partikulen diametroaren eta ohantze estatikoaren altueraren) menpekoa da, gune hauek iturria, iturburua eta eraztungunea izanik (San José eta kol., 2005).

Azpimarratzekoa da, iturburuaren erdian partikulak eta gasa kontaktuan jarri eta aldi berean gorantz mugitzen direla, baina periferian partikulak eraztungunearen goialdera itzultzen diren bitartean gasa kontrakorrontean doala gorantz. Beraz, iturri ohantze konikoak eskaintzen duen erregimena abantaila garrantzitsuak ditu gas-solido kontaktuari dagokionez eta alternatiba interesgarria izan daiteke diseinu konplexua duten beste erreaktoreen kasurako (Tamir eta Kitron, 1989; Kmiec eta Leschonski, 1991).

Iturri ohantze konikoen fluidodinamikari dagokionez, aipatzekoa da sistema hauen operazio egonkorreko baldintzak lortzeko analisi ugari burutu direla, eta lorturiko erregimenaren eboluzioak aztertu direla (San José, 1991; Olazar eta kol., 1992).

Iturri ohantze konikoaren sorrera eta ondorengo hedakuntza azaltzeko, 1.3 Irudian gasaren abiadurarekiko karga galeraren (goiko grafikoa) eta partikulen mugimenduaren (beheko irudiak) bilakaera erakusten da (San José, 1991).



1.3. Irudia. Iturri ohantze konikoan karga galeraren eta partikulen ibilbidearen bilakaera (San José, 1991).

1.3 Irudian ikusten denez hasierako ohantze finkoan, karga galera jariakinaren abiadurarekin handituz doa (grafikoaren a gunea) balio maximoa lortu arte, non ohantzea airearen igarotzea errazteko hedatu egiten den. Puntu hori ohantze finkotik iturkuntzarako trantsizioa bezala ezagutzen da. Gasaren abiadura handitzean, karga galera konstante mantentzen da iturri ohantzearen operazio egonkorreko erregimenera iritsi arte (grafikoaren b gunea), non eraztungunea eta iturgunea argi ezberdintzen diren.

Gasaren abiadura handituz doan heinean, lehenago ezberdinduta zeuden eraztungunea eta iturgunea nahasten hasten dira. Egoera horretan, karga galera jaitsiz doa eta trantsizio egoera (grafikoaren c gunea) lor daiteke. Trantsizioa eboluzionatuz doa eraztungunea eta iturgunea

bereiztea ezinezkoa den arte eta ohandzearen porositatea uniformearen izan arte (iturkuntza diluitu hasiberria deritzona).

Azkenik, iturri ohandze diluitua dugu (d gunea), non iturria, iturburua eta eraztungunea partikulek daramaten norabideari esker identifikatzen diren.

Analisi fluidodinamiko hauetarako ohandzearen altuera airearen emariarekiko irudikatzen da (Mathur eta Gihler 1955b). Emaitzen interpretaziotik airearen sarreraren diametroak, partikulen diametroak eta kontaktorearen alde konikoaren angeluak egonkortasunean duten eragina aztertu da.

Iturri ohandzeko erregimena era aiposean lortzeko, D_0/D_i erlazioa (gasaren sarrerako diametroaren eta konoaren oinarriko diametroaren arteko erlazioa $1/2$ eta $5/6$ artean egon behar da. Behe muga karga galerak eta oinarrian eratzen diren gune hilek ezartzen dute eta goi muga berriz, balio handietarako sortzen den iturgunearen mugagabetasunaren ondorioa da.

Kontaktorearen angelua, γ , 28° baino handiagoa izan behar da, ohandzea angelu txikiago batekin desegonkortzen delako. Horretaz gain, 60° baino angelu txikiagoa erabiltzea komeni da solidoa hormetan gera ez dadin.

Bestetik, ohiko iturri ohandzeen kontaktoreetarako D_0/d_p erlazioak (sarrerako diametroaren eta partikula diametroaren arteko erlazioa) 20 inguruan egon beharko luke (Mathur eta Gishler, 1955b; Passos eta kol., 1987), iturri ohandze konikoen kasuan, berriz, operazio egonkorra lortzeko erlazio hori 20 eta 30 artekoa izatera heltzen da (Olazar eta kol., 1992).

1.6. ITURRI OHANTZEAREN BARNE GAILUAK

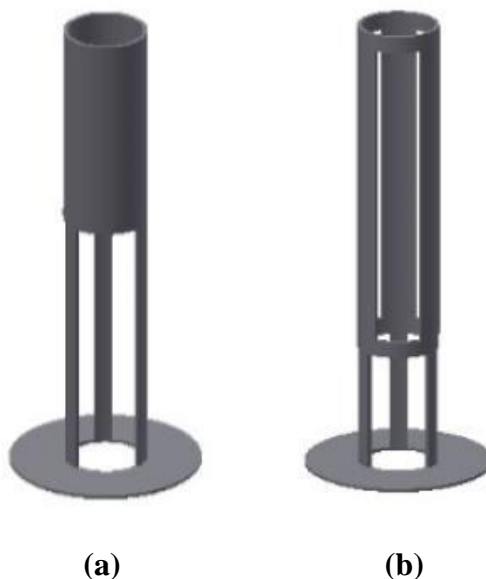
Iturri ohandzearen barne gailuak sistemaren portaera fluidodinamiko hobetzeko erabiltzen dira, egonkortasunaren emendioa ekarriz eta, ondorioz, operazio mugen zabaltzea ekarriz.

Gailu hauen artean aipagarrienak barne hodiak eta iturri bilgailuak dira. Barne hodian artean bi erabili dira lan honetan, irekiduradun hodia eta hodi solidoa (hodi ez-porotsua ere deitua). Erabili diren irekiduradun hodiak eta iturri bilgailua ikerkuntza taldeak diseinatuak izan dira.

1.6.1. Barne hodia

Iturri ohandzearen funtzionamendua ikertuz, ohandzean partikula kantitate handia dagoenean eratzen den iturria ezegonkorragoa dela frogatu zen. Beraz, solido askorekin edo altuera handiko ohandzeekin lan egiteko barne hodiak abantailak eskaintzen zituela ikusi zuten. Ohiko iturri ohandzeetan, partikulen mugimendu ziklikoan, ohandzearen gainazaletik jaisten doazenean partikulak eraztungunearen edozein posiziotatik sartzen dira iturrira, eta beraz, partikulen traiektoria zorizkoa dela esan daiteke, partikulen ziklo denborak oso ezberdinak izatea eraginez. Hau ekiditeko eta operazio baldintza hobek lortzeko barne hodia erabiltzen da.

Bi motatako barne hodiak erabili dira, hodi solidoa eta irekiduradun hodia, eta bakoitzak operazio mota ezberdinetarako ezaugarri egokiagoak ditu. 1.4 Irudian erakusten da hodian itxura.



1.4. Irudia. Barne hodi solidoa (a) eta irekiduradun hodia (b).

Barne hodiaren eginkizun nagusia solidoak eraztungunean mantentzea da, horrela, ohandzearen altuera ohiko iturri ohandzeekin konparatuz handitu eta presio galera txikituko da. Honetaz gain, erdiko hodiaren beste helburu bat iturri ohandzeen egonkortasuna eta malgutasuna hobetzea da. Barne hodiaren bidez, partikulek iturgunera sartu aurretik eraztungune osoa zeharkatu behar dutenez, partikularen mugimendua askoz kontrolagarriagoa eta erregularragoa izatea lortzen da. Horrela, partikulek antzeko ibilbidea egiten dute, euren ziklo denborak berdintsuak direlarik (Buchanan eta Wilson, 1965; Krambrock, 1976).

Barne hodi solidoen erabilera eraztungunean zeharreko gasaren filtrazioak garrantzirik ez dueneko aplikazioetarako aproposa da. Hodi solidoa erabiltzean gasaren gehiengo iturritik igoko da eta soilik irten ahalko du eraztungunera oinarrian dauden irekiduretatik zehar.

Konfigurazio honen erabilerak ekartzen dituen abantaila nagusienak operazio karga galera eta iturkuntza abiadura minimoaren murrizketa nabarmena dira. Bestalde, solidoen nahasketa maila txikiagoa denez, sistemaren etekin globala jaisten da eta operazio baldintzak finkatzeko zailtasuna ere desabantaila nabariak dira.

Operazio egokia lortzeko ohandzearen eta hodiaren altuerak berdina izatea bilatzen da. Hodi ohandzea baino altuagoa denean ez da solidoen zirkulazio egokia lortzen eta hodiaren altuera ohandzearena baino txikiagoa denean berriz, iturria ezegonkorragoa da (Amasorrain, 2005).

Ohiko erdiko hodia hodi solidoa da. Hodi mota honek itxura zilindrikoa eta gorputz solidoa du eta bere gorputzaren altuera ohandzearen altuerarekin bat etortzea saiateren da, solidoak hoditik irteteen oztoporik ez aurkitzeko. Eraztungunetik iturgunera pasatzen den solido kantitatea erdiko hodiaren hanken luzeraren arabera da.

Irekiduradun hodiak berriz, iturritik eraztungunerako gas emaria baimentzen dute tutuaren altuera osoan zehar, gas-solido ukipena handituz, eta eraztunguneko bero transferentzia hobetuz. Itsaskorak diren solidoekin lan egiteko aproposak dira hodi hauek. Hodi solidoekin konparatuz gero, gas-solido kontaktua hobetu eta zirkulazio abiadura ere hobetzen dute (Ishikura eta kol., 2003; Wang eta kol., 2010; Nagashima eta kol., 2009). Aurrekoa kontuan hartuz ikusten da irekiduradun hodia lehorketarako aproposa dela, hodi solidoarekin baino

denbora gutxiago behar delako prozesua aurrera eramateko (Altzibar eta kol., 2008). Irekiduradun hodiak aglomerazioak ekiditeko ere erabiltzen dira.

Irekiduradun hodiaren irekidura portzentaia handitzean hodirik gabeko iturri ohantzean lortzen den fluidizazio erregimena antzerakoa da.

Irekidura portzentaia txikitzean, hau da, hodiaren hanken zabalera handitzean berriz, gas-solido kontaktu pobregoa baina sistema egonkorragoa lortzen da. Honen arrazoa da, hanken zabalera handitzean hodiak hodi solidoaren antza gehiago duelako. Beraz, hodiaren hautaketa aplikazioen eta interesen arabera egingo da.

1.6.2. Iturri bilgailua

Partikula fin eta handien nahasteak edo partikula oso finak tratatzerako orduan iturri bilgailua erabiltzea beharrezkoa da, batez ere finen arraste handia gertatzen den aplikazioetan. Honek garrantzi handia du batez ere arrastatu edo galtzen diren finak katalizatzaileak bezalako material garestiak direnean. Gailu honek finen arrastea ekiditeaz gain iturria egonkortzen du, gas-solido ukipena areagotuz eta hortaz, materia transferentzia hobetuz.

Katalizatzailea erabiltzen den prozesuetan katalizatzailea tratatu nahi den materialekin nahastuta egoten da, beraz, ohantzea tamaina oso ezberdineko partikulez osatuta dago. Normalean, katalizatzaileen partikula tamaina mikra batzuetakoa izaten da eta tratatu nahi den materialena berriz, milimetro batzuetakoa. Partikula handiek fluidizaziorako behar duten abiadura partikula finek behar dutena baino askoz handiagoa denez, aireak partikula finen arrastea eragiten du kontaktoretik kanpora, honek katalizatzaileen galera handia dakarrelarik. Arazoari irtenbidea emateko iturri bilgailua sortu zen.

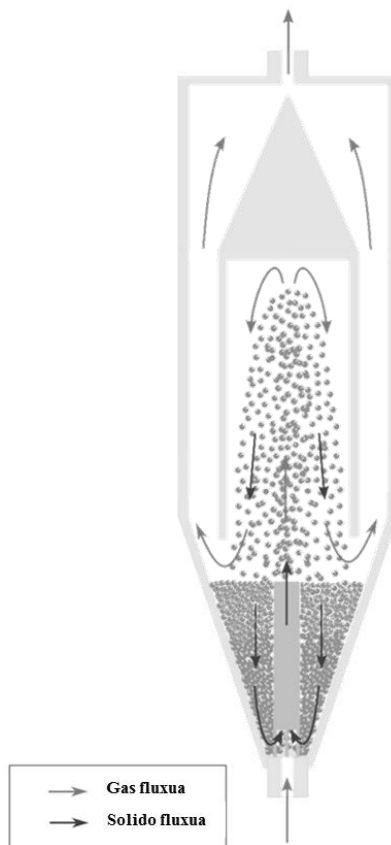
Iturri bilgailua metakrilatoz eginda dago eta kontaktorearen erdian eta goiko aldean jartzen da iturria bildu eta arrastea saihesteko. 1.5 Irudian ikusten den bezala bilgailuak goialdean kono bat du arrastatuak izaten diren partikulak bertan ez pilatzeko eta hauek ohantzera berriro erortzea sustatzeko. Konoan hiru hagatxo daude eta hauen funtzioa bilgailua eustea da, alde batera eta bestera mugitzea ekiditeko. Konoan eta hagatxoak altzairu herdoilgaitzez eginda daude.



1.5. Irudia. Iturri bilgailua.

Iturri bilgailua ohantzearen gainazalarekiko zenbat eta gorago jarri, iturriaren portaera egonkorragoa da. Beraz iturri bilgailuaren behealdearen eta ohantzearen gainazalaren arteko distantzia (H_B) iturri bilgailuaren portaera egokirako parametro oso garrantzitsua delarik (Altzibar, 2011).

1.6 Irudian kontaktorearen barruan dagoen iturri bilgailuaren funtzionamendua erakusten da.



1.6. Irudia. Iturri bilgailudun eta erdiko hodidun ohantze konikoaren funtzionamendua.

1.6 Irudian solidoak eta aireak egiten dituzten bideak erakusten dira. Solidoen bidea ohiko sistemen berdina da, baina airearena ezberdintzen da. Airearen lehendabizi iturri bilgailuaren goialdera heltzen da, gero, iturritik beherantz bideratzen da, eta ondoren, kontaktoretik irten aurretik iturri bilgailuaren behealdean eta ohantzearen arteko hutsunetik igarotzen da. Beraz, iturri bilgailuak gasaren ibilbidea aldatzen duela ikusten da.

Iturri bilgailuaren beheko aldearen eta ohantzearen arteko hutsunea eragin handia du ohantzearen portaeran (Altzibar, 2011), horren arabera operazioa egonkorra izatetik ezegonkorra izatera pasatu ahal delako. Izan ere, iturri bilgailua ohantzearen barnean sartuta badago sortzen den karga galera handia da, eta ekipoaren putzailua ez da gai iturria irekitzeko beharrezkoa den aire emaria emateko, hots, saiakuntza ezin da egin. Horregatik, iturri bilgailua ohantzearen gainazalarekiko gora kokatu behar da iturri ohantze erregimenak behar bezala funtziona dezan.

Aurrekoa kontuan harturik, alde batetik, iturrian gas-solido kontaktua hobetuko da eta horretaz gain, partikula finen arrastea ekiditen da airearekin arrastatuak diren partikulak ez direlako zuzenean iturritik kanpora aterako. Gainera, airea beherantz doanean ez da izango

gai partikula finen arraste abiadura gaintzeko (grabitate indarrak arrastearena gaintuko duelako) eta airearekin irtengo den partikula frakzioa finena soilik izango da. Honen ondorioz, finak ohantzearen gainazalera eroriko dira eta euren galera asko murriztuko da.

Lehen aipatu den bezala, arrastea ekiditeaz gain iturri bilgailuaren beste abantaila bat sistemaren egonkortzea izan da. Bilgailuak iturriaren higidura kaotikoak saihestu eta iturriaren altuera murrizten du, iturri oso altuak dituzten sistemekin lan egitea ahalbidetuz. Gainera, iturri ohantze konikoen eraginkortasuna eta fluidizazioa hobetu egiten da bilgailuaren erabilerarekin, partikula tamaina tarte zabalean lan egitea baimenduz.

1.7. ARRASTEIA ITURRI OHANTZEAN

Jariakinetan mugitzen den partikula baten arrastea, kanpo jariakinaren fluxuaren norabideko indar aerodinamiko eta hidrodinamiko guztien batuketa da. Hau dela eta, arrasteak objektuaren mugimenduaren aurkako norabidean jarduten du, eta objektutik tira egiten duen grabitate indarra arraste indarraren berdina denean abiadura terminala lortzen da. Gas abiadura altuek partikula finak arrastatuak izatea eragiten dute.

Arrastea objektu solido baten eta solido hori mugitzen duen jariakinaren (gas edo likidoa) arteko marruskadura denez, askotan, objektu baten mugimendua aztertzerakoan ez da airearen erresistentzia kontuan hartzen. Kasu askotan azken hurbilketa hau ona den arren, beste batzuetan ez da arbuigarria eta kontuan hartu behar da. Arrastea zenbatzeko arraste koefiziente adimentsionala erabiltzen da. Hala, arraste koefizientea baxua denean objektuak arraste indar txikia jasango du.

Partikulen arrastea gertatzea kaltegarria da produkzio prozesurako eta ingurumenerako. Hori dela eta, prozesuan partikulen arrastea kontuan hartu behar da, eta gas-solido ohantze fluidizatuzko errektoreen desabantailarik nagusienetarikoa bat da. Arraste ezaugarriak baldintza esperimentalen menpekoak dira, hau da, ohantzearen diametroak, altuerak, batez besteko partikula diametroak, partikula tamainaren distribuzioak eta gas emariak eragiten dute arrastean (Ma eta Kato, 1998). Kutsadura kontrol arauak, fluidizazio kalitatearen mantentze-lanek eta batzuetan, solidoen kostu altuek (adibidez, errektore katalitikoetan) arrastatutako partikulen berreskurapena beharrezkoa egiten dute (Briens eta kol., 1992). Solidoaren berreskuratze ekipoen diseinu egokirako, zikloien kasurako adibidez, solidoaren fluxua eta arrastatutako solidoen tamaina distribuzioa ondo zehaztu behar da.

Ohantze fluidizatuen aplikazioen arrakasta tekniko eta ekonomikorako kritikoa da arraste balioen auresate ahalmen ona, gas-solido bereizgailuen (zikloien eta iragazkien) diseinu optimoa (materialaren galera minimorako) auresate horren menpekoa delako (Kunii eta Levenspiel, 1990).

Partikulen tamainak arrastean duen eragina zenbait ikertzailek aztertu dute, haien artean ondoren aipatuko direnak aipagarrienak izanik. Baeyens eta kol.ek (1992), partikula finen tamaina txikitzean arraste koefizientearen emaria handiagoa zela adierazi zuten. Nakazato eta kol.ek (2004) gas-solido ohantze fluidizatuan partikula handien dentsitatea handitzeak partikula finen eta handien arrastearen murrizketa zekarrela ondorioztatu zuten. Horretaz gain, partikula handien tamaina handitzean finen arrastea gutxitzen zela ondorioztatu zuten. Era berean, Alsmari eta kol.ek (2016) arraste fluxua partikula handien eta finen dentsitatea handitu ahala gutxitzen zela ondorioztatu zuten.

2. HELBURUAK

Lan honen helburua, konfigurazio eta sistema ezberdinetako iturri ohandze konikoen portaera hidrodinamikoaren azterketa burutzea da, partikula finen arrastean sakondu nahi delarik. Erabili diren materialak zerrautsa eta beirazko bolak izan dira. Partikula finen arrastearen azterketa egiteko, helburu hauek bete nahi dira:

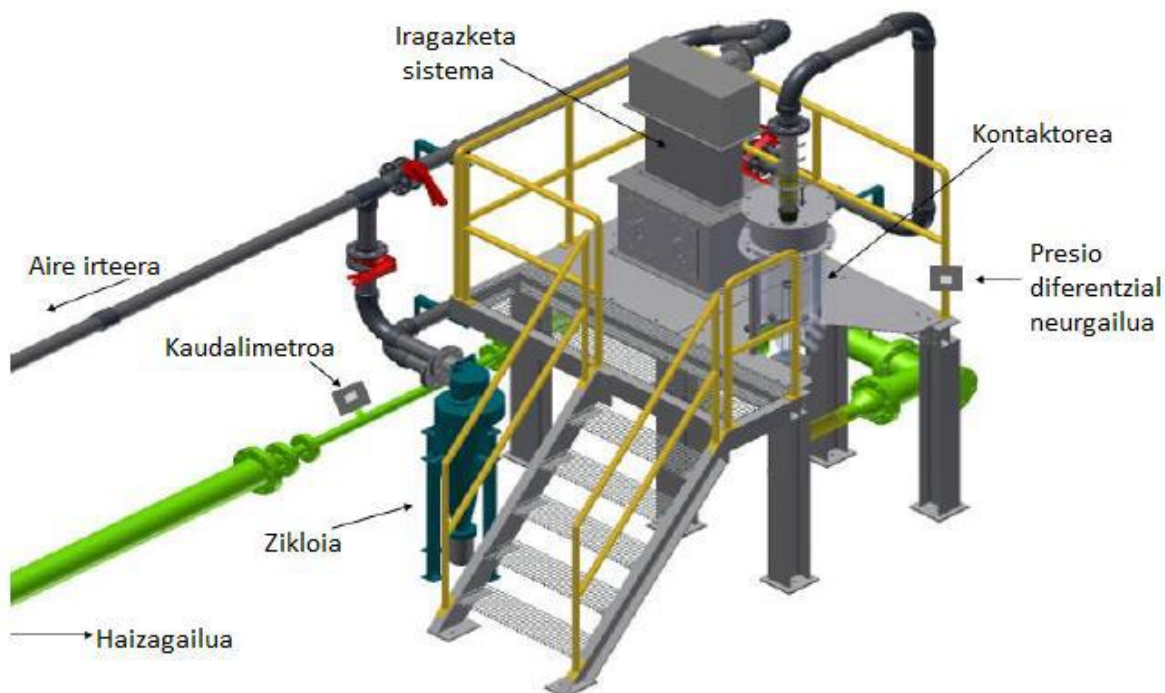
1. Partikula finen arrastearen ikerketa burutzea, konfigurazio eta sistema ezberdinak erabiliz. Erabiliko diren konfigurazioak iturri bilgailuaren erabileran ezberdintzen dira, saiakuntzak gailu hau erabiliz eta erabili gabekoak direlarik. Sistema ezberdinak berriz, erdiko hodi ezberdinak erabiliz (irekiduradun hodia eta hodi solidoa) eta hoderik gabekoak dira. Hala, ikertu diren aldagai esanguratsuenak arraste portzentaia, operazio emari masikoa (Q), partikulek ziklo bat egiteko behar duten denbora maximoa (t_{cmax}), eta karga galera egonkorraren balioa (ΔP) dira.
2. Partikula finen arrastearen bilakaera denborarekin ikertzea, hau da arrastearen eboluzioa denboran zehar nola ematen den aztertzea konfigurazio eta sistema ezberdinetarako.
3. Zerrautsaren eta ogi arrailatua bezalako partikula finen arrastearen eboluzioak konparatzea. Hala, material ezberdinak erabiltzeak arrastean nola eragiten duten aztertuko ahalko da.

3. ESPERIMENTALA

Atal honetan esperimentuetan erabili den ekipoaren deskribapena egingo da, erabili diren baldintza esperimentalak adieraziz eta erabilitako materialen karakterizazioa eginez.

3.1. EKIPOAREN DESKRIBAPENA

3.1 Irudian esperimentuetarako erabilitako ekipoaren eskema ikus daiteke. Honek haizagailua, kaudalimetroa, presio diferentzial neurgailua, kontaktorea, iragazketa sistema eta zikloia ditu.



3.1. Irudia. Ekipoaren eskema orokorra.

3.1 Irudian ez da haizagailua agertzen beheko solairuan kokatuta dagoelako, 5.5 kW-ko potentzia dauka eta bere funtzioa airea sistemarantz bidaltzea da.

Ekipo hau aldakorra da, kontaktore, iturri bilgailu, erdiko hodi eta gasaren sarrerako diametro ezberdinekin lan egitea ahalbidetzen baitu.

Presio neurgailuak bi puntuen arteko presio diferentzia neurtzen du. Kasu honetan, ohantzeak kontaktorean sortzen duen karga galera neurtzen denez, sentsoareak ohantzearen behealdean (airearen sarreran) eta kontaktorearen goialdean (airearen irteeran) daude.

Kontuan izan behar da irteerako airea ondo araztu behar dela arrastatutako partikula solidoak ez daitezen kanpora joan. Horretarako, emari txikiarako ($< 300 \text{ m}^3/\text{h}$) manga iragazkia erabiliko da eta, bestetik, emari altuetarako ($> 300 \text{ m}^3/\text{h}$) efikazia handiko zikloia. Zikloia ez da eraginkorra emari altuekin eta partikula oso finekin ($< 50 \mu\text{m}$) lan egitean; manga iragazkiak, berriz, $5 \mu\text{m}$ -ko partikulak atxikitze osoa dauka. Banandutako solidoak ontzi hermetikoetan biltzen dira eta airea purga lerroa bideratzen da. Manga iragazkia eta zikloia altzairuz eginda daude.

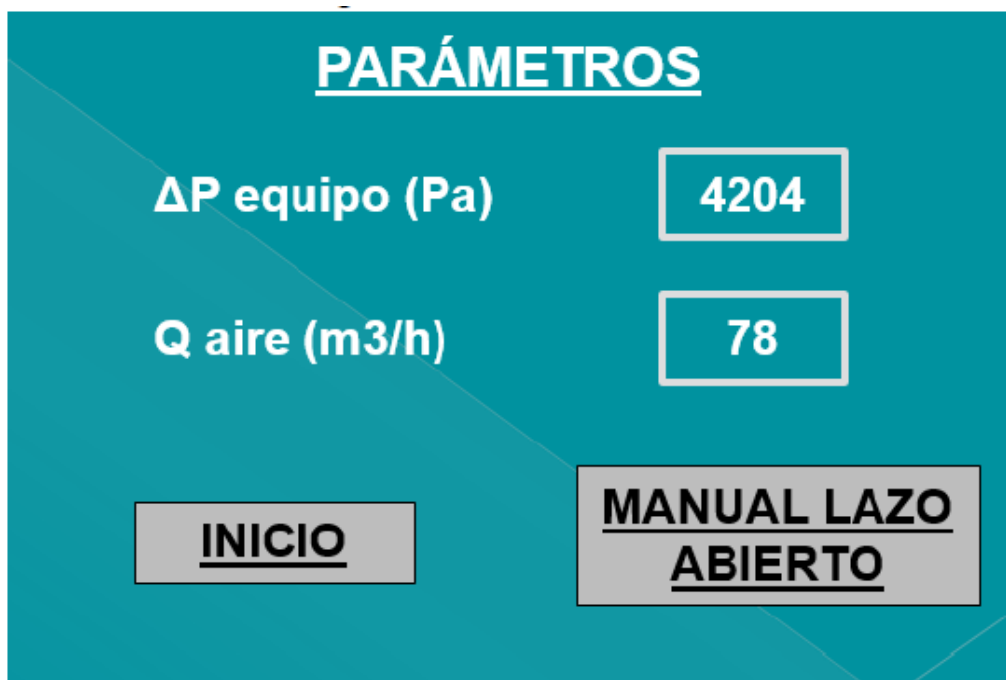
Sistema osoa kontrol panel baten bidez manipulatu da. Honen bidez haizagailua piztu edo itzaltzen da, sistemaren sarrerako emaria kontrolatzen da eta neurtutako parametroen informazioa lortzen da. Operatzeko moduak eskuz begizta itxian, eskuz begizta irekian eta automatikoan dira.

3.2 Irudian kontrol panela ikusten da, honek aurkezten dituen aukera ezberdinekin.



3.2. Irudia. Kontrol panelaren pantaila nagusia.

3.2 Irudian eskumako behealdean “Parametros” botoia sakatzean pantailan neurtutako aldagaien balioak agertzen dira. Lortutako informazioa 3.3 Irudian ikus daiteke.



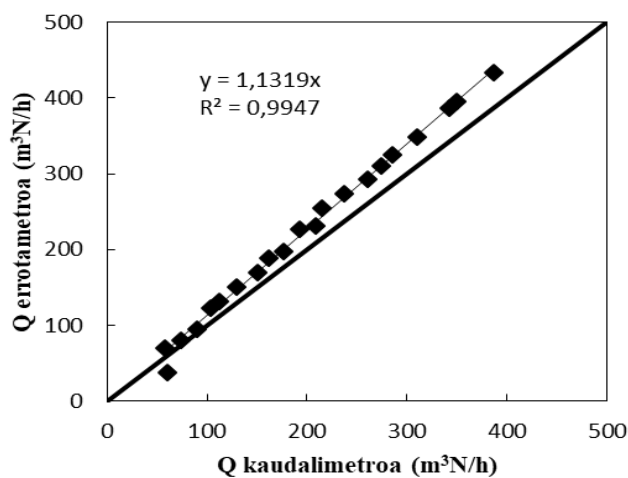
3.3. Irudia. Kontrol panelaren “Parametros” pantaila.

3.1.1. Neurgailuen kalibrazioa

Esperimentuak burutzerako orduan ezinbestekoa da parametro esanguratsuak kontrolatzeko erabilitako neurgailuaren funtzionamendu egokia ziurtatzea, kaudalimetroa kasu honetan.

Kaudalimetroaren balioak errotametroekin lortutakoekin konparatu dira. Operazio emari tarte bakarra dagoenez, esperimentuetan errotametro bakarra erabili behar izan da, emari handietarako (60 m³/h-tik 560 m³/h-ra arte) hain zuzen.

Errotametroa erabiliz lorturiko balioak ez bezala, kaudalimetroak emandako balioak baldintza normalei dagozkienak dira (0 °C eta 1 atm). Konparatu ahal izateko errotametroen balioa zuzendu behar izan da, baldintza normaletara pasatuz. 3.4 Irudian kaudalimetroaren kalibraketa irudikatu da.



3.4. Irudia. Kaudalimetroaren kalibrazio kurba.

Kalibratio kurbak agerian uzten duen bezala, balioen arteko desbideraketa ez da oso nabaria. Desbideraketaren norabideari erreparatuz ikusten da kaudalimetroak errotametroan neurtutako balioak baino balio txikiagoak lortzen dituela. Hala ere, R karratu balioa altua da eta erraz zuzendu daiteke. Kasu honetan zuzentze faktorea 1.13 dela ikusten da.

3.2. BALDINTZA ESPERIMENTALAK

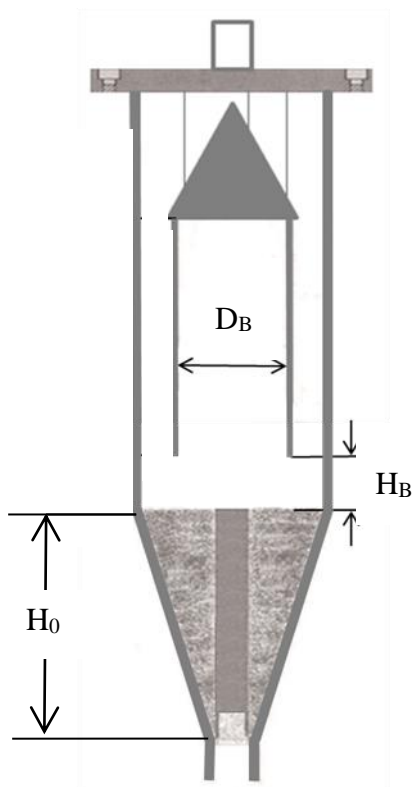
Burututako esperimentuetan mota bakarreko kontaktoreak erabili dira, bere ezaugarriak eta dimentsioak 3.1 taulan ikusten direlarik.

3.1. Taula. Esperimentuetarako erabili diren aldagaiak eta hauen balioak.

Aldagaia	Balioa
γ (°)	45
H_0 (cm)	27
D_B (cm)	20
Barne hodia	HG, IH, HS
D_0 (cm)	4
D_T (cm)	4
H_C (cm)	35
D_C (cm)	36
H_B (cm)	8

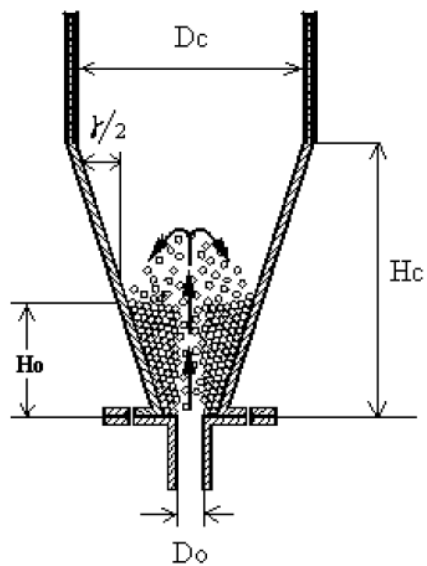
Non γ kontaktorearen angelua, H_0 ohantzearen altuera, D_B iturri bilgailuaren diametroa, HG hoderik gabeko sistema, IH irekiduradun hodiaren sistema, HS hodi solidodun sistema, D_0 airearen sarrerako diametroa, D_T barne hodiaren diametroa, H_C kontaktorearen zati konikoaren altuera, D_C zati zilindrikoaren diametroa, \bar{d}_p partikulen batezbesteko diametroa eta H_B ohantzearen eta bilgailuaren behealdearen distantzia diren.

3.5 Irudian sistemaren geometriarekin zerikusia duten aldagaiak irudikatuta ikusten dira.



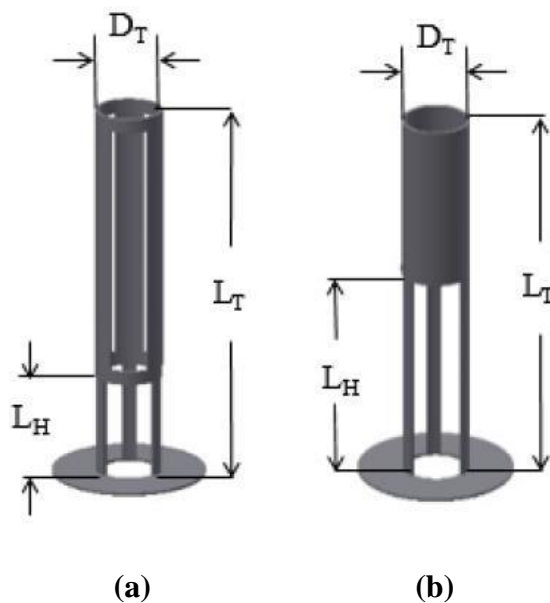
3.5. Irudia. Bilgailudun iturri ohatzearen aldagaiak.

3.6 Irudiak erabilitako kontaktorearen faktore geometriko desberdinak aurkezten ditu.



3.6. Irudia. Kontaktore konikoaren faktore geometrikoak.

Esperimentuetan erabilitako hodian ezaugarriak 3.7 Irudian ikusten dira.



3.7. Irudia. Irekidura hodiaren (a) eta hodi solidoaren (b) faktore geometrikoak.

Hurrengo taulan erabilitako hodian ezaugarriak aurkezten dira.

3.2. Taula. Barne hodian ezaugarriak.

Faktore geometrikoa	Irekiduradun hodia	Hodi solidoa
L_T (cm)	27	27
D_T (cm)	4	4
L_H (cm)	7	7
IP (%)	57	-

Non L_T barne hodiaren altuera, D_T hodiaren diametroa, L_H hanken altuera, eta IP hodiaren irekidura portzentaia izango den, ehunekoetan adierazita.

3.3. KARGA GALERAREN NEURKETA

Esperimentuak egiterakoan ohantzearen karga galera ($\Delta P_{ohantzea}$) lortu nahi denez, neurtzen den karga galera totalari (ΔP_{totala}) kontaktorea hutsik dagoenean sortzen dena (ΔP_{hutsa}) kendu behar zaio, hurrengo ekuazioak adierazten duen moduan:

$$\Delta P_{ohantzea} = \Delta P_{totala} - \Delta P_{hutsa} \quad (1)$$

Kontaktorea hutsik dagoenean sortzen den karga galera neurtzeko, hau erabat husten da eta gainontzeko baldintzak ohiko saiakuntzetan bezala mantentzen dira. Modu honetan, aireak ekipo osoa zeharkatzeagatik jasaten duen karga galera kalkulatzeko posiblea da aire emari ezberdinetarako.

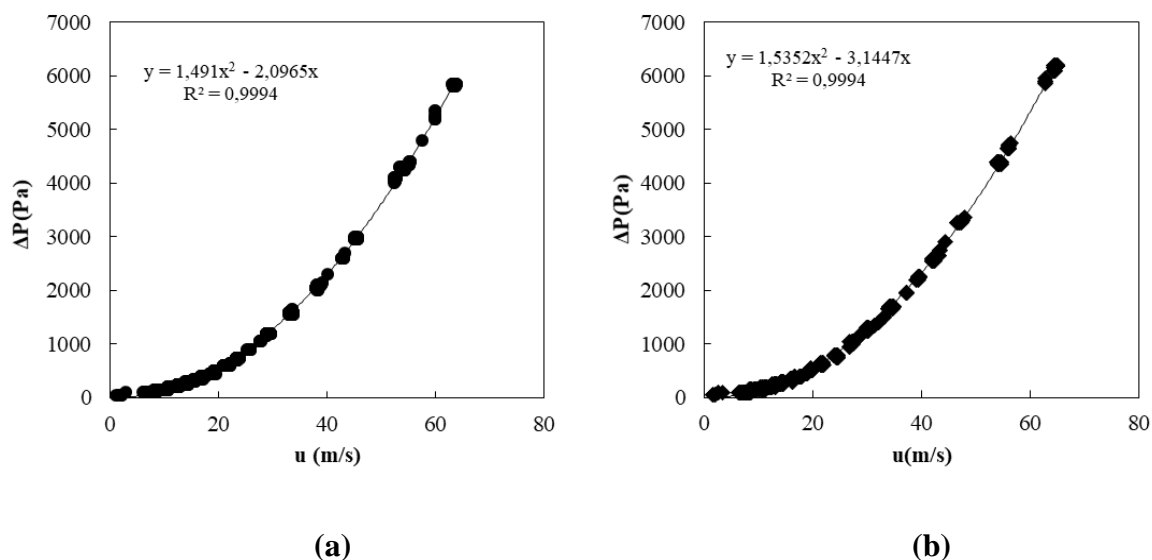
Bi ΔP_{hutsa} kalkulatu dira, lehenengoa manga iragazkia erabiltzen denean eta bigarrena zikloia erabiltzen denean. Hau egin behar da zikloia eta manga iragazkia erabiltzean emari tarte ezberdinak erabiltzen direlako, presio galeran eragin ezberdina eginez.

Esperimentu hauen emaitzak kontaktore hutsaren karga galera vs aire emaria bezalako grafikoetan irudikatzean eta bigarren mailako polinomio batera doitzean eskuratzen diren adierazpenak ondorengoak izanik:

$$\text{Zikloia erabiltzean:} \quad \Delta P_{\text{hutsa, zikloi}} = 1.491 u^2 - 2.0965 u \quad (2)$$

$$\text{Manga iragazkia erabiltzean:} \quad \Delta P_{\text{hutsa, filtro}} = 1.5352 u^2 - 3.1447 u \quad (3)$$

Adierazpen hauek jarraian aurkezten diren grafikoetatik, hau da 3.8 Iruditik, lortu dira.



3.8. Irudia. Hutsaren karga galera zikloia (a) eta manga iragazkia (b) erabiliz.

3.4. MATERIALEN KARAKTERIZAZIOA

Lan honetan material ezberdinak erabili dira eta atal honetan material horien ezaugarriak azalduko dira.

Prozesu errealean gertatzen dena simulatzeko asmoz, partikula fin eta lodien nahasteak erabili dira. Ohantzean zati handiena partikula lodiek osatzen dute, beirazko bolak erabili direlarik lodi gisa. Izan ere, beira tamaina ezberdineko partikulekin lan egiteko eredu egokia da; beiraren dentsitatea beste material askoren antzekoa da, eta beraz, esperimentuetatik lortzen diren emaitzak eta ondorioak beste material ezberdinekin egindakoekin konpara daitezke. Gainera, beraren ezaugarri nagusia portaera ideala izatean datza. Partikula fin moduan berriz zerrautsa erabili da.

Solidoaren tamaina mugatzeko orduan, 0.001 m baino partikula diametro txikiagoa duten solidoak partikula fin gisa hartu diren bitartean, 0.001 m baino handiagoak direnak partikula handi gisa hartu dira.

Jarraian, esperimentuetan erabilitako material bakoitzaren deskribapen zehatzagoa egingo da.

3.4.1. Beirazko bolak

Beirazko bolekin lehen eman diren ezaugarriak dituztenez, iturri ohantzeetan erabiltzeko ezin hobeak dira. Erabili diren beirazko bolen partikula diametroa 0.004 m-koa izan da.

Beirazko bolekin itxura erregularra eta partikula tamaina homogenea dutenez, euren dentsitatearen kalkulua masaren eta bolumenaren arteko zatiketaren datza. Hala, beirazko bolen dentsitatea 2434 kg/m^3 da. Beirazko bolen dentsitate aparentea (ρ_b) ere esperimentalki neurtu da. Era honetan bolen ohantzearen dentsitatea 1531 kg/m^3 da.

3.4.2. Zerrautsa

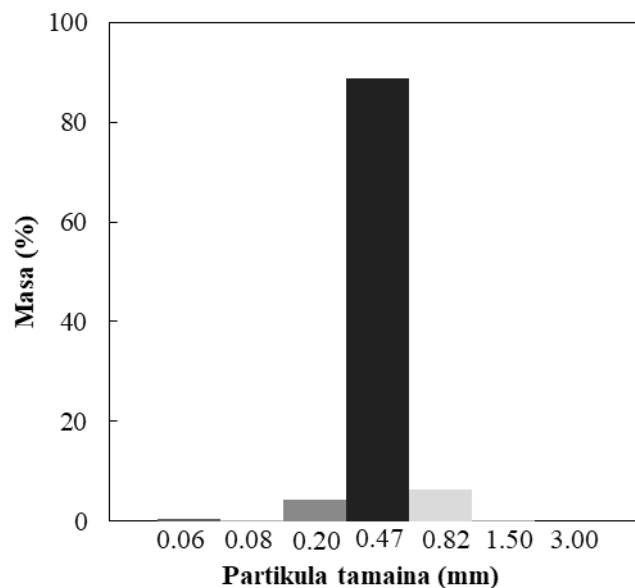
Biomasa energia berriztagarrietarako lehengai interesgarria bihurtzen ari da. Lan honetan pinu zerrautsa erabili da, beste biomasa lignozelulozikoaren konposizio adierazgarria duelako. Zerrautsa material irregularra da, forma eta tamaina ezberdineko partikulaz osatuta dagoelako.

Zerrautsaren dentsitate aparentea beirazko bolekin erabili den prozedura berberari jarraituz neurtu da, eta 208 kg/m^3 da. Zerrautsaren partikula tamaina kalkulatzeko banaketa granulometrikoa burutu da.

3.3. Taula. Zerrautsaren banaketa granulometrikoa.

Tamaina tarreak (mm)	Masa (%)
<0.063	0.46
0.063-0.15	0.02
0.15-0.315	4.30
0.315-0.63	88.89
0.63-1	6.32
1-2	0.01
2-4	0

3.9 Irudian zerrautsaren banaketa granulometrikokoaren irudikapena agertzen da.



3.9. Irudia. Zerrautsaren banaketa granulometrikoa.

Partikularen gainazal/bolumenean oinarrituriko batez besteko diametroa 3.3 Taulako balioak erabiliz eta hurrengo ekuazioa aplikatuz kalkulatu da.

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\left[\sum \left(\frac{x_i}{d_{p_i}} \right) \right]} \quad (4)$$

(4) Ekuazioaren bidez kalkulaturiko diametroari Sauter-en batez besteko diametroa ere baderitzo eta ekuazio horren bidez lortu den zerrautsaren batez besteko tamaina 0.45 mm da.

3.4.3. Ogi arrailatua

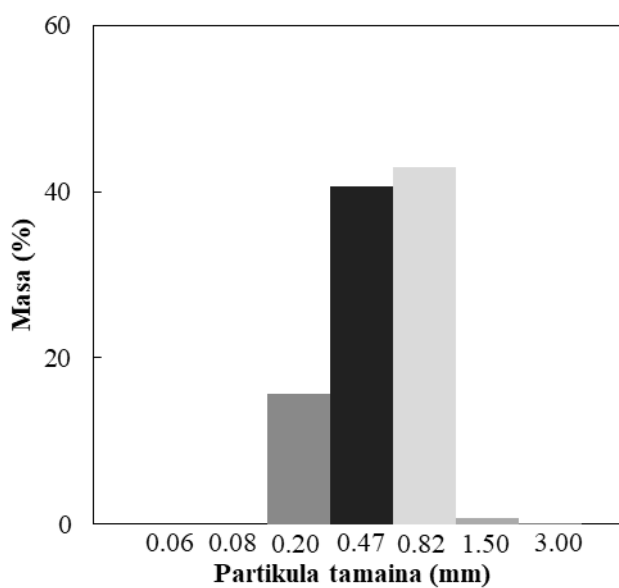
Ogi arrailatua arraste saiakuntzetan erabili da, zerrautsarekin konparaketa burutzeko. Ogi arrailatuaren partikula dentsitatea 1038 kg/m^3 da eta dentsitate aparentea berriz, 536 kg/m^3 .

Ogi arrailatuaren partikula tamaina kalkulatzeko banaketa granulometrikoa burutu da.

3.4. Taula. Ogi arrailatuaren banaketa granulometrikoa.

Tamaina tarreak (mm)	Masa (%)
<0.063	0
0.063-0.15	0
0.15-0.315	15.69
0.315-0.63	40.64
0.63-1	42.91
1-2	0.71
2-4	0.05

3.10 Irudian zerrautsaren banaketa granulometrikoaren irudikapena agertzen da.



3.10. Irudia. Ogi arrailatuaren banaketa granulometrikoa.

(4) Ekuazioaren bidez lortu den ogi arrailatuaren batez besteko tamaina 0.46 mm da.

4. EMAITZAK

Gradu amaierako lan honen helburu nagusia gas solido kontaktua eskaintzen duten ekipoetan partikula fin eta lodien nahasteekin lan egitean sortzen den partikula finen arrastea aztertzea da. Hala, informazio hori erabiliz sistema bakoitzerako joera partikularrak eta joera orokorrak determinatu ahalko dira da.

Lehenik eta behin, barne hodi mota bakoitza erabiliz (eta hoderik gabe) partikula fin eta lodien arteko nahasteekin operazioan ematen den arrastearen azterketa orokorra burutuko da (bilgailua erabiliz eta bilgailurik gabe), haien arteko ezberdintasunak eta antzeko puntuak identifikatuz. Hala, esperimenduetan neurtu diren aldagai nagusiak, finen arraste portzentaia, operazio emari masikoa (Q), partikulek ziklo bat egiteko behar duten denbora maximoa (t_{cmax}), eta karga galera egonkorren balioa (ΔP) dira.

Aipatutako aldagai nagusien artean, Q eta ΔP zuzenean kontrol paneletik lortzen dira. Ziklo denbora partikula batek ohantzearen edo eraztungunearen gainazaletik kontaktorean beherantz jaitsi, iturgunera sartu eta berriz ere ohantzearen gainazalera heltzeko behar duen denbora da. Hau neurtzeko partikula ohantzearen goialdera heltzen denetik behera heltzen den arte jarraitzen da eta denbora hori neurtzen da. Hainbat aldiz egiten da neurketa eta lortu den baliorik handiena izango da t_{cmax} .

Ikerlari batzuen ustetan, karga galera zehaztasun handiagoz neur daiteke airearen abiadura jaistean (Mathur eta Epstein, 1974 b; Kucharski eta Kmiec, 1983; San José, 1991). Horrexegatik, lan honetan presio galera egonkorra eta iturkuntzarako emari minimoa airearen abiadura poliki-poliki murriztuz (iturri txikiena lortu arte) neurtu dira. Erregimen zurrumbilotsua lortzeko operazio emaria, emari minimoa baino %50 handiagoa izan behar da. Horregatik, operazio emaria lortzeko emari minimoa bider 1.5 egin da (Altzibar eta kol., 2017).

Ondoren, arrastearen bilakaera aztertu da eta barne hodi bakoitzerako (eta hoderik gabe) bilgailua erabiliz eta bilgailurik gabe erdietsi den arraste joerak konparatuko dira.

Azkenik, partikula fin moduan zerrautsa erabiliz lortutako arraste joerak beste material mota bat (ogi arrailatua) erabiliz lortutakoekin konparatu dira materialak arrastean nola eragiten duen aztertzeko.

4.1. ARRASTE AZTERKETA KUANTITATIBOA

Arraste azterketaren esperimenduekin hasteko, partikula fina den zerrautsa kontaktorerara elikatze modu ezberdinak erabiliz arrastearen eragina aztertu da. Hurrengo taulan erakusten dira aztertu diren elikatze moduak eta lortu diren arraste emaitzak.

4.1. Taula. Finen elikatzeke modu ezberdinak erabiliz lortutako arraste portzentaien emaitzak.

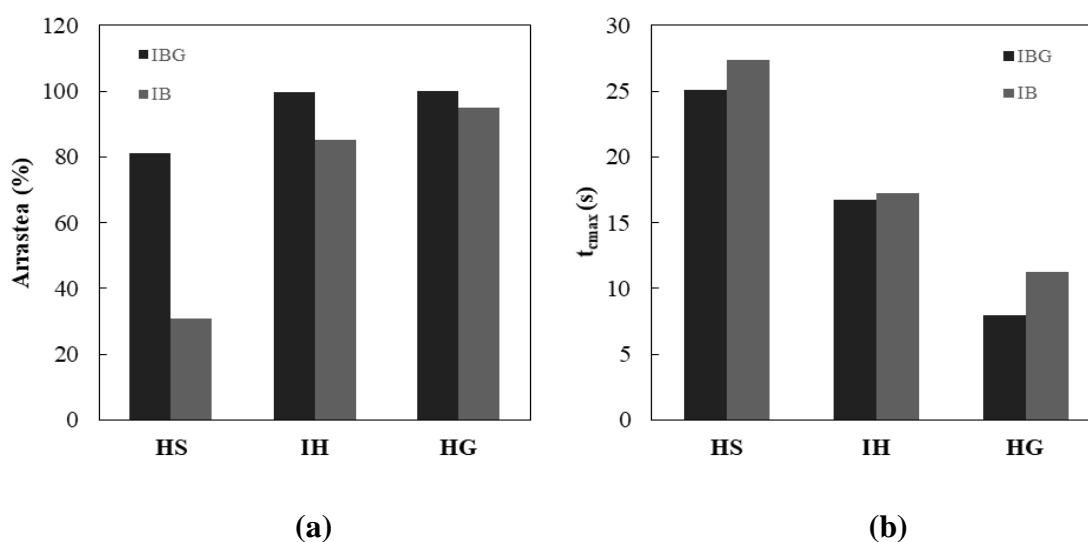
Elikatzeko modua	Arrastea (%)
Sakabanatuta	99.86
Tartean	90.32
Puntu batean	85.04

Ikusten den bezala elikatzeke hiru modu ezberdin aztertu dira. Lehenengoan, behin ohantzean beirazko bolak kargaturik kontaktorearen goialdea guztiz ireki eta zerrautsa beirazko boleki osatzen duten ohantzearen gainazal guztian sakabanatuta elikatu da. Bigarren moduan, kontaktoreara beirazko bolen erdia elikatu ostean zerrautsa gehitu da, eta ondoren gehitu da beirazko boleki osaturiko ohantzearen beste erdia. Hirugarren moduan, zerrautsa kontaktorearen goialdean dagoen elikaduraren sarrerako puntu batetik elikatu da beirazko boleki osatzen duten ohantzearen gainazalera.

Elikatzeko modu hauek aztertu ondoren, ikusi da zerrautsa puntu batean elikatzean operazioan arraste gutxiago gertatzen dela, eta horregatik, esperimentu guztiak modu honetan egin dira.

Jarraian, erdiko hodi mota ezberdinak erabiliz, erdiko hodirik gabe, iturri bilgailua erabiliz eta bilgailurik gabe lorturiko emaitzak aurkeztuko dira histogrametan. Horretarako, sistema ezberdinen arrastearen balioak kalkulatu eta irudikatu dira. Sistemak euren artean ezberdintzeko, hurrengo nomenklatura erabili da: iturri bilgailu gabeko sistemak (IBG), iturri bilgailudun sistemak (IB), erdiko hodi solidodun sistemak (HS), irekiduradun erdiko hodidun sistemak (IH), eta erdiko hodirik gabeko sistemak (HG).

Lehenik eta behin, saiakuntzetan eskuratutako arraste portzentaiak eta ziklo denbora maximoen balioak erakusten dira 4.1 Irudian.



4.1. Irudia. Erdiko hodi mota ezberdinak erabiliz lortutako finen arrastearen ehunekoak (a) eta ziklo denbora maximoak (b) iturri bilgailudun eta bilgailu gabeko sistemetan.

4.6 Irudiko (a) grafikoari erreparatur, zenbait ondorio atera daitezke. Alde batetik, frogatuta geratzen da iturri bilgailuak nabarmen murrizten duela finen arrastea, izan ere iturri bilgailurik gabeko sistemetan lortzen dira arraste balio handienak.

Bestetik, erabiltzen den erdiko hodi motaren arabera ikusi da arraste balio txikienak eragiten dituen sistema hodi solidodun sistema dela (%31-81), arraste balio handienak berriz, erdiko hodirik gabeko sisteman gertatzen direla (%95-99), eta irekiduradun hodidun sisteman bitarteko balioak (%85-98) lortzen direla.

Emaitzak aztertzerako orduan, alde batetik, kontuan izan behar da airearen banaketa ohantzean. Erdiko hodirik gabe airea iturritik eraztungunera altuera guztian zehar sartzen denez, ohantzean mugimendu kaotikoa sortzen da. Erdiko hodi solidoak erabiltzean aldiz, airea erdiko hoditik igo eta ohantzearen erdian iturria sortzen da. Hala, partikulen mugimendu zikliko egonkorragoa eragiten da, eta iturriaren jarduera kaotikoak saihesten dira, ohantzeari egonkortasuna emanez.

Honetaz gain, erdiko hodi solidoekin lan egitean, kontaktorerara sartzen den airearen frakzio handiena iturgunean zehar igotzen da eta frakzio txiki bat soilik doa eraztungunean zehar. Irekiduradun hodiak erabiltzea berriz, airearen frakzio handiagoa igarotzen da eraztungunera, eta ondorioz, iturri bilgailua erabiltzean fin kantitate handiagoa arrastatzen du aireak. Honela, hodi solidoak erabiliz sortzen den iturburua irekiduradun hodiak erabiliz sortzen dena baino askoz luzeagoa denez, aireak kanpora fin gehiago arrastatzen ditu. Iturri bilgailua erabiltzean berriz, airearen frakzio handiena kanpora zuzenean joan beharrean iturri bilgailua zeharkatzera behartzen da, eta honek finen frakzio handiagoa ohantzean geratzea eragiten du. Gainera, kontuan izan behar da operazioan behar den airearen emaria handiagoa dela irekiduradun hodia erabiltzen den sistemetan, eta batez ere, erdiko hodirik gabeko sistemetan, honek arraste handiagoa sortzea eragiten duelarik (Altzibar, 2011; Altzibar eta kol., 2017; Estiati, 2017).

Balioei dagokienez, arrasterik handiena ez iturri bilgailurik ezta erdiko hodirik duten sistemetan gertatzen den bitartean (%99.92), arrasterik txikiena iturri bilgailua eta erdiko hodi solidoa duten sistemetan ematen da (%30.76).

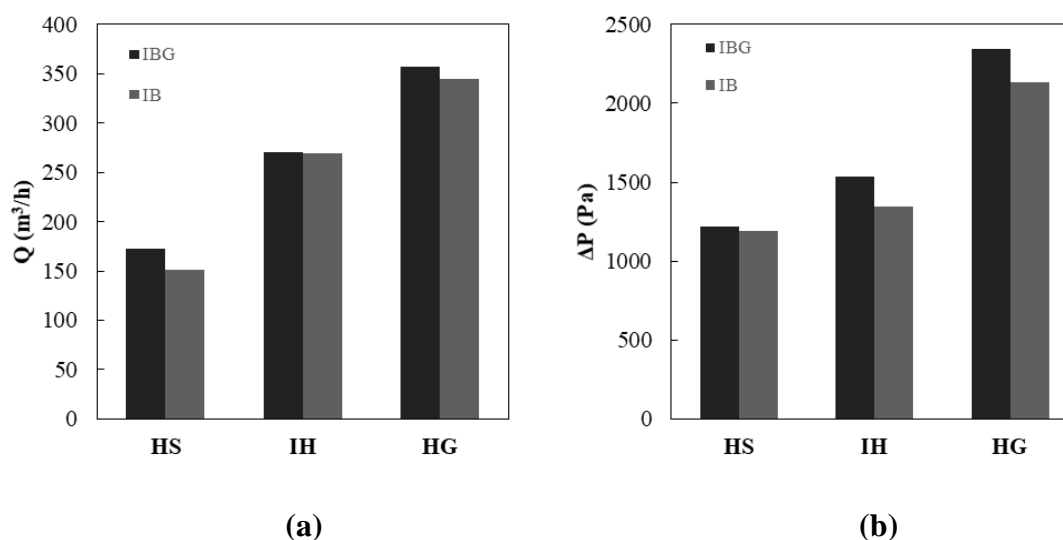
Aipatu behar da unibertsitateko ikerkuntza taldean, aurretik ogi arrailatua erabiliz egin diren esperimenduetan, zerrautsa erabilitakoetan baino arraste txikiagoa lortu dela. Aldiz, hodi mota bakoitzaren joera mantentzen da. Horrela, hodi solidoa erabiliz lortzen da arraste txikiena (%10-64), irekiduradun hodia erabiliz tarteko balioa (%29-81) eta hodirik gabe gertatzen da arraste handiena (%47-83) (Estiati, 2017). Datu hauek ikusita, 4.3 atalean ogi arrailatua eta zerrautsaren arteko ezberdintasunak aztertuko dira sakonago.

4.6 Irudiko (b) grafikoan ikusten denez, bilgailurik gabeko sistemetan ziklo denbora maximoak bilgailua erabiliz lortzen direnak baino txikiagoak dira. Joera hau ulertzeko lehen aipatu den airearen zirkulazioa kontuan hartu behar da. Horrela, aurrerago sakonduko den moduan, iturri bilgailua erabiltzean operazio emari txikiagoak behar dira eta zirkulazioa motelagoa izango da, honek ziklo denborak altuagoak izatea eragiten duelarik.

Sistema ezberdinei erreparatur, hodi solidodun sistemek ziklo denbora maximoen baliorik handienak (25.1-27.34 s) dituzte, hodirik gabeko sistemek ziklo denbora maximoen baliorik txikienak (8-11.28 s) dituzte eta irekiduradun hodidun sistemek aurreko bien arteko balioak (16.75-17.22 s) dituzte. Izan ere, hodirik gabeko eta irekiduradun hodidun sistemek iturkuntza abiadura minimoaren balio handia dutenez, sortzen den karga galera handiagoa da. Honek

ohantzearen mugimendua areagotzen du eta ondorioz, partikulak zikloa egiteko behar duen denbora laburragoa da (Altzibar eta kol., 2011; Saldarriaga eta kol., 2015; Estiati, 2017).

Jarraian, 4.2 Irudian, arraste saiakuntzetan eskuratutako emariak eta karga galera egonkorak irudikatuko dira. Grafiko hauek egiterakoan kontuan izan behar da emaria, eta batez ere, karga galera egonkorraren balioa esperimentuan zehar aldatuz joan dela. Horregatik, emariak eta karga galera egonkorak saiakuntzaren hasieran, erdian eta amaieran dituzten balioak hartu dira, eta balio horien batez bestekoa kalkulatu da.



4.2. Irudia. Erdiko hodi mota ezberdinak erabiliz lortutako operazio emari (a) eta karga galera egonkorren (b) balioak iturri bilgailudun eta bilgailu gabeko sistemetan.

4.2 Irudiko (a) grafikoan ikusten denez, iturri bilgailu gabeko sistemetan operazio emaria ($172\text{-}357 \text{ m}^3/\text{h}$) iturri bilgailudun sistemetan ($151\text{-}345 \text{ m}^3/\text{h}$) baino handiagoa da. Joera hau ematen da iturri bilgailuak iturria bildu eta zirkulazioa egonkortzen duelako, hortaz, emari baxuagoekin lan egitea ahalbidetzen du. Emaitza hauek kontuan hartuz ikusten da lehen aipatu den bezala operazio emaria eta ziklo denbora alderantziz proportzionalak direla (Altzibar, 2011; Estiati, 2017), hau da, aire emari handia behar duten sistemetan zirkulazioa azkarragoa da, eta ondorioz ziklo denborak laburragoak.

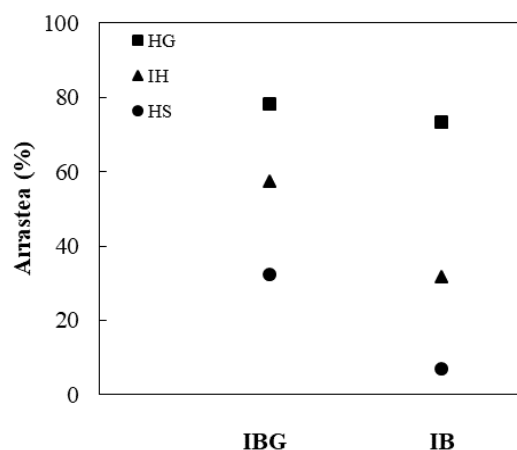
Erdiko hodiaren eraginari dagokionez, hodirik gabeko sistemai dagozkien emari altuenak ($345\text{-}357 \text{ m}^3/\text{h}$), hodi solidodun sistemai emari baxuenak ($151\text{-}172 \text{ m}^3/\text{h}$), eta irekiduradun hodidun sistemai bitarteko balioak ($269\text{-}271 \text{ m}^3/\text{h}$). Hodi solidoa erabiltzen den saiakuntzetan eraztungunetik igotzen den aire frakzioa txikia da, aire gehiena hoditik igotzen baita. Ildo beretik, aire frakzio gehiena hoditik igotzean ohantzea apurtzeko beharrezko emaria txikiagoa izango da. Erdiko hodirik gabeko saiakuntzetan emaria handiena behar da operazio egonkorra lortzeko beharrezkoa den aire emaria askoz ere handiagoa delako; hau da, ohantzea apurtzeko emari handiagoa behar delako (Altzibar eta kol., 2013; Saldarriaga eta kol., 2016; Estiati, 2017).

4.7 Irudiko (b) grafikoan erakusten den moduan, karga galeraren joera emariarentzat lortutako berdina da bai iturri bilgailu bai erdiko hodi mota ezberdinetarako. Hala, antzeman daiteke iturri bilgailudun sistemek ($1188\text{-}2136 \text{ Pa}$) bilgailurik gabekoek ($1219\text{-}2347 \text{ Pa}$) baino karga galera egonkor txikiagoa dutela. Joera hau iturri bilgailua erabiltzeak ohantzea egonkortzen duelako ematen da, karga galera txikitzen delarik.

Sailkapena erdiko hodi motaren arabera egiten bada, emariaren joera berdina mantentzen da, hodirik gabeko sistemek karga galera egonkoraren balio altuenak sortzen dituzte (2136-2347 Pa), hodi solidoa duten sistemek balio txikiak (1188-1219 Pa), eta irekiduradun hodia duten sistemek bitarteko balioak (1346-1536 Pa). Hodirik gabeko saiakuntzetan, partikula ohandzearen altuera guztian zehar pasa daitekeenez eraztungunetik iturgunera, sortuko den karga galera handiena izango da. Irekiduradun hodiak erabiltzean aldiz, partikulak iturgunera ohandze guztian zehar pasa daitezkeen arren, erdiko hodiaren hankek partikula gutxiago igarotzea eragiten dute, horrek karga galera txikiagoa izatea eraginez. Hodi solidodun sistemetan ordea, airea hodiaren hanketatik bakarrik igaro daiteke iturgunera, airearen frakzio handiena hodian zehar igoko da eta frakzio txiki bat (hodiaren hanketatik pasa daitekeena) eraztungunean zehar soilik igoko da. Honen ondorioz, sortuko den karga galera beste sistemena baino txikiagoa da (Altzibar, 2011; Altzibar eta kol., 2014; Estiati, 2017).

4.2. PARTIKULA FINEN ARRASTEAREN EBOLUZIOA DENBORAREKIN

Arrastearen bilakaera denborarekin determinatzeko helburuarekin, atal honetan denboran zehar arrastatuak izan diren partikulen pisuaren jarraipena egin da. Aurretik egindako arrastearen azterketa kuantitatiboko esperimenduetan ikusi da arraste handiena operazioaren hasieran gertatzen dela. Lehen aipatu bezala, ohandzea apurtzeko hasieran behar den abiadura minimoa baino %50 handiagoa denez, momentu horretan emango da partikulen arraste handiena (Estiati, 2017). Egoera hau, esperimendua martxan jartzean bakarrik ematen denez, hasteko lehenengo minutuan ematen den arrastea neurtu da. 4.3 Irudian erakusten da neurtu den hasierako arrastea hodi solidodun (HS), irekiduradun hodiadun (IH) eta hodirik gabeko (HG) sistemetan, bilgailua (IB) erabiliz eta erabili gabe (IBG).



4.3. Irudia. Partikulen arrastea operazioko lehenengo minutuan, sistema ezberdinetarako, bilgailua erabiliz eta erabili gabe.

4.3 Irudian ikusten denez operazioaren hasieran ematen den arrastearen portzentaia sistema motaren arabera da.

Arraste handiena ez bilgailu ezta hodirik ez duten sistemetan ematen da (%78.28). Sistema hauetan bilgailua erabiliz arrastea oso gutxi murrizten da (%73.42). Hau gertatzen da hodirik gabeko sistemetan ezegonkortasuna oso handia delako eta bilgailuak ezin duelako guztiz egonkortu.

Bestalde, arraste portzentai txikiena (%6.9) hodi solidoa eta bilgailudun sistemetan ematen dela ikusten da. Sistema honetan, bilgailurik gabe arraste portzentaia igotzen dela ikusten da. Hala ere, bilgailurik gabeko sistemen artean, arraste txikiena hodi solidoarekin lortzen da (%32.52). Hau ematen da, hodi solidoarekin bilgailua erabili gabe sistema nahiko egonkorra delako. Horrela, bilgailuak iturria oso ondo biltzen du eta ohantzearen egonkortasuna oso handia da.

Irekiduradun hodidun sistemetan, tarteko arrastearen balioak lortzen dira. Sistema mota honetan sortzen den iturria, hodi solidodun sistemetan baino zabalagoa da. Hori dela eta, bilgailuak ez du iturria hainbeste biltzen eta arrastea handiagoa da. Sistema honetan bilgailua erabiltzeak, arrastea erdira murriztea eragiten du. Horrela, bilgailua erabiltzean %31.68ko arrastea lortzen da eta bilgailua erabili gabe %57.42koa.

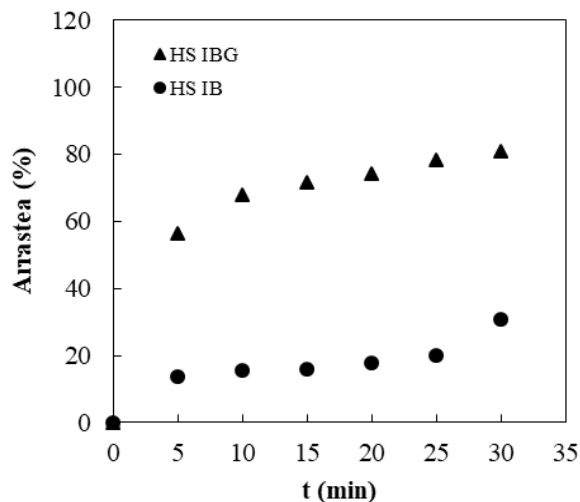
Sistema ezberdinen joerak 4.1 (a) Irudian lortutakoen berdinak direla ikusten da. Honen zergatia 4.1 atalean azaldu delarik.

Arraste emaitzen azterketa osatzeko eta kualitatiboki ikusi diren joerak balioztatzeko asmoz, arrastearen eboluzioaren saiakuntzak egin dira. Horretarako, 4.1 ataleko arraste saiakuntzak egiteko erabili den antzeko prozedura jarraitu da eta aurreko ataleko arraste saiakuntzetan erabili diren aldagai berdinak mantendu dira konstante (esperimentuak euren artean konparagarriak izan ahal izateko). Hala, esperimentuak 45°ko kontaktorean eta 0.04 m-ko gasaren sarrerako diametroarekin egin dira. Erdiko hodien dimentsioei dagokionez, 0.04 m-ko diametroa, 0.27 m-ko altuera, %57ko irekidura portzentaia (irekiduradun hodien kasuan) eta 0.07 m-ko hanken luzera (hodi ez-porotsuen kasuan) izan dira.

4.1 atalean bezala, arraste esperimentuek hogeita hamar minutu irauten dute. Denbora tarte honetan, 5 minuturo esperimentuan gertatzen denaren jarraipena egin da. Hala, lehenengo saiakuntzan, bost minutu pasatu direnean gelditu da saiakuntza, eta arrastea neurtu da. Bigarren saiakuntzan berriz berdina egin da baina hamar minutu igaro direnean gelditu da saiakuntza. Horrela jarraitu da ikerketa seigarren saiakuntzan hogeita hamar minutu aztertu direlarik. Saiakuntza gelditu den bakoitzean, ohantzea tamizatu egin da eta gertatu den finen arrastea neurtu da, eta hurrengo esperimenterako prestatu da nahastea. Aipagarria da, saiakuntza bakoitzerako prestatu den nahasteak hasierako kantitate eta tamaina proportzio berberak izan dituela, saiakuntza guztietan baldintza berdinekin lan egiteko.

Saiakuntzak, lehen aipatu bezala, hodi ezberdinak erabiliz (eta hodirik gabe) eta bilgailua erabiliz eta erabili gabe egingo dira.

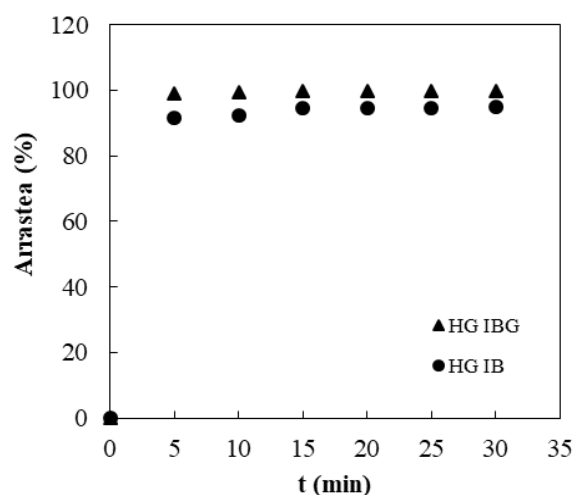
4.4 Irudian ikus daiteke arrastearen bilakaera hodi solidodun sisteman, iturri bilgailua erabiliz eta erabili gabe.



4.4. Irudia. Partikulen arrastearen bilakaera hodi solidodun sistemetan, bilgailua erabiliz eta erabili gabe.

4.4 Irudian ikus daitekeenez, bilgailua erabiliz eta erabili gabe 4.1 (a) irudian lortutako joerak mantentzen direla frogatu da. Beste alde batetik, arraste gehiena lehenengo bost minutuetan ematen dela ikusten da (%13.82-56.24), lehen aipatutakoa frogatuz. Ondoren, arrastea pixkanaka igotzen doa 5 minuturo. Igoera honen arrazoia da iturri oso altuak sortzen dituen sistema dela hodi solidoena, iturriak bilgailuaren goialdearekin talka egiten duelarik, eta operazioan denbora aurrera joan ahala partikula finen atrizioa (apurketa) ematen doa denborarekin, nahiz eta gero ikusiko den bezala arbuigarria den apurketa hau beste materialekin gertatzen denaren ondoan. Aipagarria da sistemen konparazioa eginaz iturri bilgailuak arraste murrizketa handiena sistema honetan eragiten duela, %30.76-80.98koa.

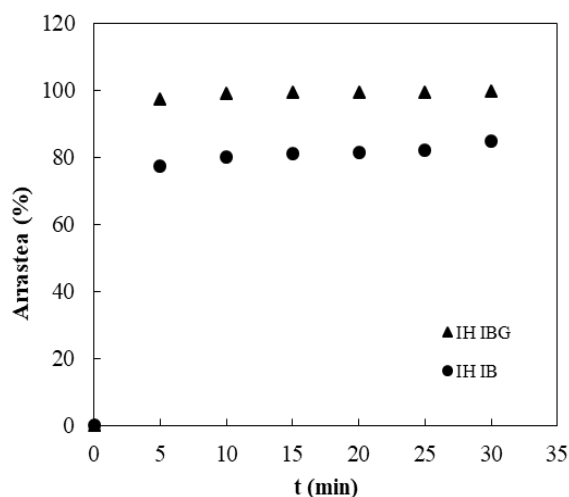
4.5 Irudian arrastearen bilakaera aztertuko da hodirik gabeko sistemetan, iturri bilgailua erabiliz eta erabili gabe.



4.5. Irudia. Partikula arrastearen bilakaera hodirik gabeko sistemetan, bilgailua erabiliz eta erabili gabe.

Ikusten denez hendirik gabeko sistemetan ere 4.1 (a) Irudiko joerak mantentzen dira eta arraste handiena lehenengo 5 minutuetan ematen da. Lehen aipatu den bezala, hendirik gabeko sistemetan, ez da hodi solidoaren sistemen bilakaera berdina mantentzen. Hendirik gabeko sistemetan, ikusten da arrastea oso handia dela lehenengo 5 minutuetan (%91.52-99.04) eta ondoren igotzen doala baina oso gutxi, joera ia konstantea izanez. Honen arrazoa da hodidun sistemekin baino iturri baxuagoa sortzen dela, eta beraz denborarekin finak (zerrautsa) ez direla apurtzen. Ondorioz hasierako arrastea ia konstante mantenduko da (ia ez dira fin gehiago sortuko), eta amaieran %94.98-99.2ko arrasteak lortzen dira. 4.5 Irudian ikusten da bilgailuak ez duela asko eragiten arrastearen, 4.3 Irudian azaldu den zergatiatik; hala ere bilgailuak arrastea txikitzen duela frogatu da.

Ondoren, 4.6 Irudian arrastearen bilakaera aztertuko da irekiduradun hodidun sistemetan, iturri bilgailua erabiliz eta erabili gabe.



4.6. Irudia. Partikulen arrastearen bilakaera irekiduradun hodidun sistemetan, bilgailua erabiliz eta erabili gabe.

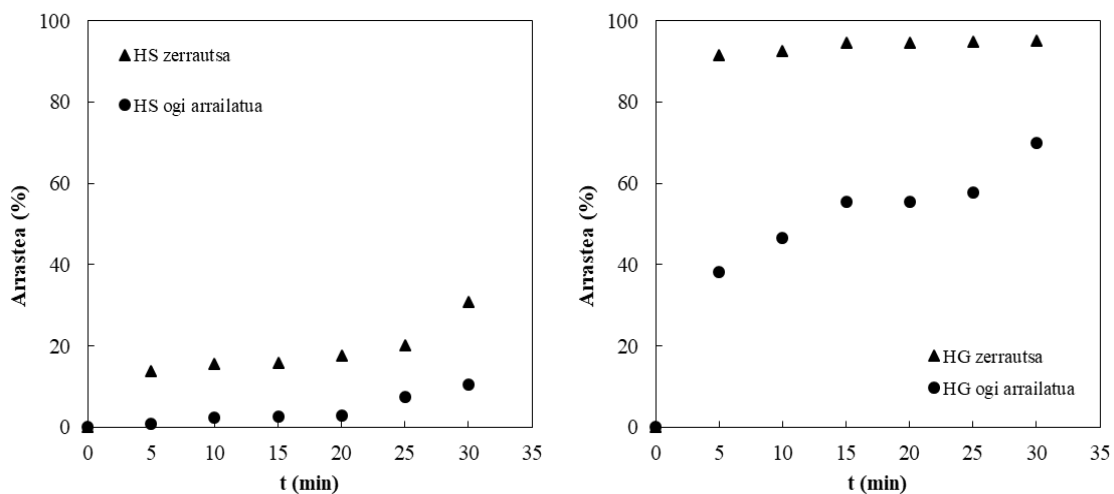
Ikusten denez irekiduradun hodidun sistemetan ere 4.1 (a) Irudiko joerak mantentzen dira. Irekiduradun hodidun sistemetan ikusten da arrastea handia dela lehenengo 5 minutuetan ematen dela (%77.56-97.46) eta ondoren igotzen joaten dela baina oso gutxi, nahiz eta hendirik gabeko sistemetan baino gehiago izan, iturria handiagoa delako. Hau, lehen esan bezala, zerrautsaren atriziorik ematen ez delako gertatzen da, eta ondorioz arrastea ia konstante mantentzen da lehen minutuak pasa ondoren, bukaeran %85.04-99.74-ko arrasteak lortzen direlarik. Hala, iturri bilgailuak arrastea irekiduradun hodidun sistemetan, hendirik gabeko sistemetan baino gehiago murrizten duela frogatzen da.

4.3. MATERIAL FIN EZBERDINEN ARRASTEAREN KONPARAKETA

Atal honen helburua partikula lodi eta finen nahastearen eraginaren ikerketarekin jarraitzea da, baina kasu honetan, beira eta zerrautsa nahastearekin lorturiko emaitzak, beira eta ogi arrailatua nahastearekin lorturikoekin konparatuko dira. Beraz, zerrautsa eta ogia arrailatua bezalako bi material fin ezberdinen arrastearen konparaketa egingo da.

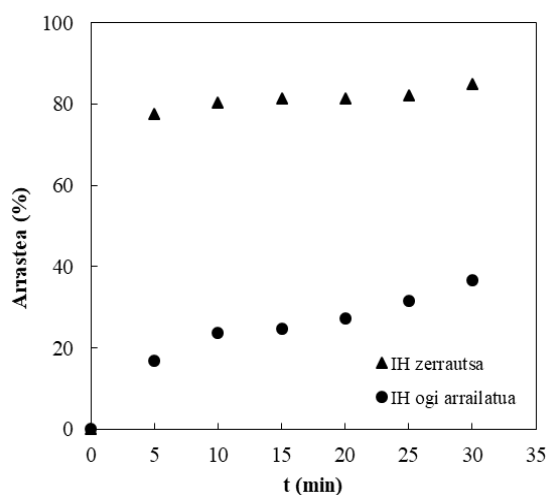
Aipatu behar da, konparaketa soilik bilgailudun sistemekin egin dela, izan ere, ogi arrailatuaren esperimentueta bilgailurik gabe arraste oso handia ematen zenez, arrastearen eboluzioak bilgailua erabiliz bakarrik aztertu dira (Estiati, 2017).

4.7 Irudian bilgailudun sistema ezberdinak erabiliz bi materialen arraste bilakaerak erakusten dira.



(a)

(b)



(c)

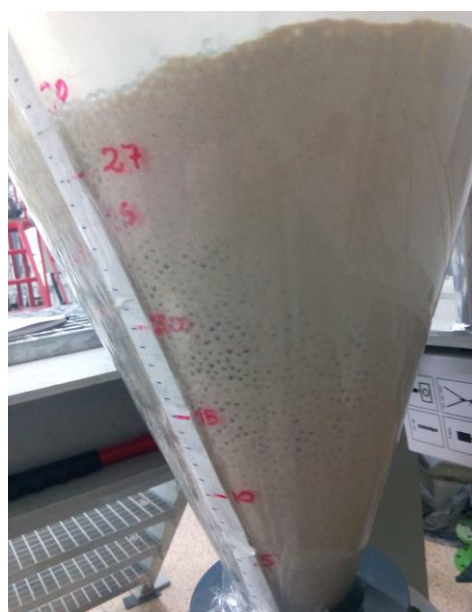
4.7. Irudia. Finen arrastearen bilakaerak ogi arrailatua eta zerrautsa erabiliz, hodi solidodun (a), hodirik gabeko (b) eta irekiduradun hodidun (c) sistemetan.

Grafikoei erreparatuz bi ondorio nagusi atera daitezke. Lehenengoa, zerrautsarekin ogi arrailatuarekin baino arraste handiagoa lortzen dela sistema guztietan, eta bestalde zerrautsaren eta ogi arrailatuaren eboluzioak ezberdinak direla. Jarraian bi ondorio hauek banaturik aztertuko dira, bakoitzaren zergatiak azalduz.

4.7 Irudian ikustenenez, zerrautsarekin lortutako arrasteak, ogi arrailatuarekin lortutakoak baino handiagoak dira sistema guztietan. Hasierako 5 minutuetan arraste handiena ematen da bi materialekin. Zerrautsa erabiliz, arrastea %60 inguru handiagoa da irekiduradun hodidun eta hodirik gabeko sistemetan. Hodi solidodun sistemetan berriz, arrastea %12 handiagoa da zerrautsa erabiltzen den kasuetan. Hau 4.2 atalean adierazi den arrazoiengatik gertatzen da, sistema honetan bilgailuak eraginkortasun handiena duelako.

Ogi arrailatua erabiltzen den kasuetan, zerrautsarekin lorturiko joera berdinak mantentzen dira sistema motei dagokienez. Hau da, arraste handiena hodirik gabeko sisteman, arraste txikiena hodi solidodun sisteman eta tarteko balioa irekiduran hodidun sisteman ematen da (Estiati, 2017).

Bi materialekin egindako esperimentuetan ezberdintasun nabarmena ikusi da ohantzean material finak banatzen diren moduan. 4.8 Irudian erakusten dira zerrautsaren eta ogi arrailatuaren ohantzeko banaketa.



(a)



(b)

4.8. Irudia. Ohantzearen itxura esperimentuan zehar, ogi arrailatua (a) eta zerrautsa (b) erabiltzen direnean.

4.8 (a) Irudian ikustenenez, ogi arrailatua erabiltzen den esperimentuetan, materiala guztiz nahastuta geratzen da beirazko bolekin ohantze guztian zehar. Beraz, ohantzearen gainazalean ez da egongo hainbeste finik eta arrastea txikiagoa izango da. 4.8 (b) Irudian berriz, ikusten da zerrautsa ez dela ohantzearen behealdera heltzen eta goialdean metatuta geratzen da. Arrazoi honengatik, ohantzearen gainazalera material gehiago igoko da, aireak fin gehiago arrastatuz eta beraz arraste handiagoa sortuz.

4.8 Irudian ikusten dena ulertzeko ogi arrailatuaren eta zerrautsaren itxura aztertu behar da. Zerrautsa tamaina eta itxura ezberdineko partikulaz osatuta dago. Partikula hauek irregularrak dira eta batzuk filamentu erakoak. Ohantzearen gainazaletik jaistean zerrautsaren filamentuak

ezin dute sartu ohantzeroa, beirazko bolen artean igarotzea zaila izango delarik. Hori dela eta, zerrautsa ez da gai izango ohantzearen behealdera heltzeko. Ogi arrailatuaren partikulak berriz, zerrautsarenak baino erregularragoak eta esferikoagoak dira. Beraz, partikula hauek beirazko bolen artean erraz sartuko dira ohantze osoan zehar, arraste txikiagoa lortuz.

Beste alde batetik, 4.7 Irudian ikusten da ogi arrailatuaren eta zerrautsaren joerak esperimenduetan zehar ezberdinak direla.

Antzekotasun handiena duen joera 4.7 (a) irudian ikusten da. Hau lehen aipatu den bezala hodi solidoarekin arraste txikiena ematen delako eta denbora pasatzean gutxika gehiago arrastatzen delako da. Horregatik, zerrautsaren joera gorakorra dela ikusten da.

4.7 Irudian ikus daitekeenez, ogi arrailatuarentzako, hiru sistemetan joera gorakorra da, hau da, denbora igaro ahala arrastatua izan den portzentaia gero eta handiagoa da. Joera hau beirazko bolen eta ogi arrailatuaren arteko talken ondorioa da, ogi arrailatu partikulak apurtzean gero eta finago egiten baitira eta, beraz, errazago dira arrastatuak (Estiati, 2017).

4.7 (b) eta (c) irudietan zerrautsarentzako joera ia konstantea mantentzen dela ikusten da. Hau gertatzen da, lehenengo bost minutuetan arrastea oso handia delako eta ondoren denbora igaro ahala zerrautsa ez denez apurtzen, arraste portzentaia ia konstante mantenduko da. Aurretik, 4.8 (b) irudian ikusi denez, zerrautsa ez da ohantze guztian zehar sakabanatzen eta horregatik beirazko bolen eta zerrautsaren artean talka gutxiago ematen da, zerrautsa ia ez apurtzea eraginez.

Zerrautsaren atrizioa apenas ematen ez dela frogatzeko, esperimenduen aurretik (tamizatu berria) eta esperimenduen ondoren lortzen den zerrautsaren granulometria neurtu da. 4.2 Taulan aipatutako bi materialen granulometriak erakusten dira. Aipatzekoa da tamizatzerakoan ikusi dela hasieran zerrauts partikulak aglomeratuta daudela eta esperimenduak egin ondoren bananduz joan direla.

4.2. Taula. Zerrautsaren granulometria saiakuntzaren hasieran eta bukaeran.

Tamaina tarreak (mm)	Masa, hasieran (%)	Masa, bukaeran (%)
<0.063	0.46	1.21
0.063-0.15	0.02	0.04
0.15-0.315	4.30	17.04
0.315-0.63	88.89	80.88
0.63-1	6.32	0.79
1-2	0.01	0.03
2-4	0	0

Non masa hasieran, esperimendua hasi aurreko (tamizatu berria) banaketa granulometrikoa den, eta masa bukaeran, esperimenduen ondorengoa den (ohantzearena eta filtrokoarena batera).

4.2 Taulan ikusten denez hasieratik bukaerara finen kantitatea ez da asko handitzen. Hasieran zerrautsaren batezbesteko d_p 0.45 mm-koa dela neurtu da eta bukaeran 0.36 mm-koa. Horrela, taulan ikusten da hasieran 0.315-0.63 mm tartean zeuden partikula batzuk pixka bat apurtu egin direla, 0.15-0.315 mm tartera pasatuz. Hala ere, kantitatea oso txikia denez zerrautsa ia

ez dela apurtzen ondorioztatu da, 4.7 Irudiko joerak azalduz. Zerrautsa ez dela apurtzen ikusteko 4.9 Irudian hasieran eta bukaeran duen itxura erakusten da.



(a)



(b)

4.9. Irudia. Zerrautsaren itxura tamizatu berria denean (a) eta esperimientuen bukaeran (b).

4.9 (a) Irudian ikusten da filamentuak agertzen direla material finean. 4.9 (b) irudian berriz ikusten da filamenturik ez dagoela, arrastatuak izan direlako esperimientuan zehar. Hau, lehen aipatu bezala, filamentuak ohantzera ezin direlako sartu ematen da, ohantzearen gainazalean geratu eta arrastatuak izaten direlarik. Begi bistaz ikusten da filamentuak kenduta zerrautsaren gainontzeko partikulak ez direla ia apurtu, 4.2 taulako balioak erakusten duten bezala.

Ogi arrailatua berriz, lehen esan bezala esperimientuan zehar apurtzen doa. Tamizatu berriaren batezbesteko d_p 0.46 mm izanik eta esperimientuen ondoren 0.31 mm izanik (Estiati, 2017). 4.3 Taulan granulometriak aztertuko dira.

4.3. Taula. Ogi arrailatuaren granulometriak hasieran eta bukaeran.

Tamaina tartekak (mm)	Masa, hasieran (%)	Masa, bukaeran (%)
<0.063	0	3.57
0.063-0.15	0	0.03
0.15-0.315	15.69	27.60
0.315-0.63	40.64	46.91
0.63-1	42.91	21.43
1-2	0.71	0.44
2-4	0.05	0.03

Ikusten den moduan, tamizatu berri den ogi arrailatuak partikula lodi gehiago ditu zerrautsarekin konparatuta. Partikula gehienak 0.315-1 mm tartean daude. Esperimientuen bukaeran ikusten da lodiak (0.63-1 mm tartean) erdira murriztu direla eta finak (0.15-0.315 mm tartean) bikoiztu egin direla. Hortaz, frogatuta geratzen da ogi arrailatua apurtu egiten dela. Beraz, 4.7 Irudiko ogi arrailatuaren joerak frogatuta geratzen dira.

5. ONDORIOAK

Lan honetan lortutako emaitzetatik atera daitezkeen ondorio garrantzitsuenak hurrengoak dira atal bakoitzaren arabera sailkatuta.

- Arrastearen azterketa kuantitatiboa (beirazko bola lodi eta zerrautsa finen arteko nahastea erabiliz):
 - Zerrautsa ohantzera elikatzeke era desberdinen artean, erabilitako baldintza esperimentaletan arraste txikiena zerrautsa puntu batean elikatzean ematen da (%85.04). Zerrautsa bolen tartean elikatzean, %90.32ko arrastea lortzen da. Arraste handiena (%99.86) zerrautsa ohantzean sakabanatuta elikatzen denean gertatzen da.
 - Iturri bilgailurik gabeko sistemetan arraste balio handienak lortzen dira (%81-99). Iturri bilgailua erabiltzeak, aldiz, portzentaje hau txikitzen du (%31-95). Beraz, frogatuta geratzen da iturri bilgailuak nabarmen murrizten duela finen arrastea.
 - Erdiko hodi motaren arabera ikusi da arraste balio txikienak eragiten dituen sistema hodi solidodun sistema dela (%31-81), arraste balio handienak berriz, erdiko hodirik gabeko sisteman gertatzen direla (%95-99), eta irekiduradun hodidun sisteman bitarteko balioak (%85-98) lortzen direla. Arrasterik handiena ez iturri bilgailurik ezta erdiko hodirik ez duten sistemetan gertatzen den bitartean (%99.92), arrasterik txikiena iturri bilgailua eta erdiko hodi solidoa duten sistemetan ematen da (%30.76).
 - Iturri bilgailurik gabeko sistemek ziklo denbora maximoaren baliorik txikienak dituzte. Iturri bilgailua duten sistemetan berriz, balioak handiagoak dira, hau da, iturri bilgailua erabiliz zirkulazioa moteldu egiten da beirazko bola lodi eta zerrautsa finen arteko nahastea erabiltzen denean. Hodi solidoa duten sistemek ziklo denbora maximoen baliorik handienak (25.1-27.34 s) dituzte, hodirik gabeko sistemek ziklo denbora maximoen baliorik txikienak (8-11.28 s) dituzte eta irekiduradun hodia duten sistemek aurreko bien arteko balioak (16.75-17.22 s) dituzte. Izan ere, hodirik gabeko eta irekiduradun hodidun sistemek iturkuntza abiadura minimoaren balio handia dutenez, sortzen den karga galera handiagoa da. Honek ohantzearen mugimendua areagotzen du eta ondorioz, partikulak zikloa egiteko behar duen denbora laburragoa da.
 - Iturri ohantze erregimena lortzeko, bilgailurik gabeko sistemetan, bilgailudun sistemetan baino aire emari altuagoa behar da. Erdiko hodiaren eraginari dagokionez, hodirik gabeko sistemei dagozkie emari altuenak (345-357 m³/h), hodi solidodun sistemei emari baxuenak (151-172 m³/h), eta irekiduradun hodidun sistemei bitarteko balioak (269-271 m³/h).
 - Karga galera egonkorraren balio altuenak iturri bilgailurik gabeko sistemek eragiten dituzte. Iturri bilgailua erabiltzean berriz, karga galera txikiagoa lortzen da. Erdiko hodirik gabeko sistemek, karga galera egonkorraren balio altuenak (2136-2347 Pa) dituzte, hodi solidodun sistemek balio txikienak (1188-1219 Pa) eta irekiduradun hodia duten sistemek bitarteko balioak (1346-

1534 Pa), baina hodirik gabekoetatik oso hurbil erabili den irekiduradun hodiaren irekidura portzentajea %57koa izan delako.

- Partikula finen arraste saiakuntzen eboluzioa:
 - Partikula finen arrastearen azterketa kuantitatiboan egindako esperimentuetan ikusi da operazioaren hasieran gertatzen dela arraste handiena. Hau determinatzeko helburuarekin esperimentuen lehenengo minutuan ematen den arrastea neurtu da. Erdiko hodi solidodun sistemetan lortzen da arraste txikiena (6.9-32.52%). Hodirik gabeko sistemetan berriz, balio handienak (73.42-78.28%) eta irekiduradun hodiko sistemetan tarteko balioak lortzen dira (31.68-57.42%).
 - Erdiko hodiak erabiltzean arraste portzentajea handiagoa da denbora igaro ahala. Lehenengo bost minutuetan (ohantzea irekitzean) gertatzen da arrasterik handiena, ondoren apur bat handitzen doalarik.
 - Hodi solidoa erabiltzean, lehenengo bost minutuetan emandako arrastea (arraste balio altuena) %13.82-56.24koa izan da sistemaren arabera, eta ondoren, arrastea pixkanaka handitzen doa 5 minuturo. Igoera honen arrazoia da iturri oso altuak sortzen dituen sistema dela hodi solidoena, iturriak bilgailuaren goialdearekin talka egiten duelarik, eta operazioan denbora aurrera joan ahala partikula finen atrizioa (apurketa) ematen doa denborarekin. Irekiduradun hodiak erabiltzean ordea, arraste handiena %77.56-97.46koa izan da eta ondoren igotzen doa baina portzentaje txikian, kurbaren joera ia konstante mantenduz. Hodirik gabeko sistemetan ematen da arraste handiena, %91.52-99.04koa izan delarik sistemaren arabera eta irekiduraduradun hodiaren joera mantendu da. Joera honek, arrastea operazioko lehen 5 minutuen ondoren ia konstantea mantentzea suposatzen du, bi sistema hauetan ez baita atriziorik ematen.
- Material fin ezberdinen arrastearen konparaketa:
 - Operazioan erabiltzen den material fina zerrautsa denean ogi arrailatua erabiltzen denean baino arraste handiagoa sortzen da, sistema eta konfigurazio guztietarako. Irekiduradun hodidun eta hodirik gabeko sistemetan arrastea %60 inguru handiagoa da. Hodi solidodun sistemetan berriz, arrastea %12 handiagoa da zerrautsa erabiltzen denean.
 - Ogi arrailatua erabiltzen den esperimentuetan, operazioan zehar materiala guztiz nahastuta geratzen da beirazko bolekin ohantze guztian zehar. Beraz, ohantzearen gainazalean ez da egongo pilaturik hainbeste finik, eta ematen den arrastea txikiagoa izango da. Zerrautsa erabiltzean berriz, ez da ohantzeko material lodiekin hainbeste nahasten eta goialdean metatuta geratzen da. Arrazoi honengatik, aireak kanpora bidean fin gehiago arrastatuko ditu (gainazaletik gehiena).
 - Ogi arrailatua erabiltzen den sistemetan, arrastearen eboluzioaren kurbaren joera gorakorra da, hau da, denbora igaro ahala arrastatua izan den finen portzentaia gero eta handiagoa da. Joera hau beirazko bolen eta ogi arrailatuaren arteko talken ondorioa da, denbora aurrera joan ahala ogi arrailatu

partikulen atrizio handiagoa ematen baita, eta beraz partikulak finago bihurtzen direnez errazago arrastatzen dira. Zerrautsaren kasuan berriz, joera ia konstante mantentzen da. Hau gertatzen da, lehenengo bost minutuetan arrastea oso handia delako eta ondoren denbora igaro ahala portzentai oso txikia arrastatzen delako. Joera hau zerrautsaren atrizioa ez delako ematen gertatzen da.

6. NOMENKLATURA

$d_p, \overline{d_p}$	Partikularen diametroa eta batez besteko diametroa, mm.
D_0	Gasaren sarrerako diametroa, cm.
D_C	Kontaktorearen gune zilindrikoaren diametroa, cm.
D_B	Iturri bilgailuaren diametroa, cm.
D_i	Kontaktorearen oinarriaren diametroa, cm.
D_T	Barne hodiaren diametroa, cm.
H_0	Ohantzearen altuera, cm.
H_C	Kontaktorearen zati konikoaren altuera, cm.
H_B	Ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunearen altuera, cm.
HG	Barne hodirik gabeko sistemak.
IB, IBG	Iturri bilgailuz eta iturri bilgailurik gabe osaturiko sistemak.
IH	Irekiduradun hodiz osaturiko sistemak.
HS	Hodi solidoz osaturiko sistemak.
IB, IBG	Iturri bilgailuz eta iturri bilgailurik gabe osaturiko sistemak.
IP	Irekidura portzentaia, %.
L_H	Barne hodiaren hanken altuera, cm.
L_T	Barne hodiaren altuera, cm.
Q	Airearen emaria, m ³ /h.
u	Airearen abiadura, m/s.
R	Erregresio koefizientea.
t_{\max}	Ziklo denbora maximoa.
t	Denbora, min.
x_i	Tamaina bakoitzeko partikulen frakzioa.

Sinboloak

ΔP	Karga galera egonkorra, Pa.
γ	Kontaktorearen angelua, °.
ρ_b	Dentsitate aparentea, kg/m ³ .
$\Delta P_{\text{ohantzea}}$	Ohantzearen karga galera, Pa.
ΔP_{totala}	Neurturiko karga galera totala, Pa.
ΔP_{hutsa}	Kontaktore hutseko karga galera, Pa.
$\Delta P_{\text{hutsa,zikloi}}$	Kontaktore hutseko karga galera, zikloia erabiltzean, Pa.
$\Delta P_{\text{hutsa,fitro}}$	Kontaktore hutseko karga galera, fitroa erabiltzean, Pa.

7. BIBLIOGRAFIA

Alsmari, T. A., Grace, J. R., Bi, X. T. Effects of particle properties on entrainment and electrostatics in gas-solid fluidized beds. *Powder Technol.*, 290, 2-10 (2016).

Altzibar, H., Lopez, G., Álvarez, S., San José, M. J., Barona, A., Olazar, M. A draft-tube conical spouted bed for drying fine particles. *Drying Technology.*, 26, 308-314 (2008).

Altzibar, H. Erdiko hodi ezberdinez hornituriko iturri ohandze konikoen ikerketa hidrodinamikoa eta beraien aplikazioa lehorketan. Doktorego Tesia, UPV/EHU (2011).

Altzibar, H., Lopez, G., Olazar, M., Bilbao, J. Effect of temperature on fine particle drying in a draft-tube conical spouted bed. *Chem. Eng. Technol.*, 34, (7) 1130 (2011).

Altzibar, H., Lopez, G., Estiati, I., Bilbao, J., Olazar, M. Minimum spouting velocity of conical spouted beds equipped with draft tubes of different configuration. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52, 2995-3006 (2013).

Altzibar, H., Lopez, G., Bilbao, J., Olazar, M. Operating and peak pressure drops in conical spouted beds equipped with draft tubes of different configuration. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 415-427 (2014).

Altzibar, H., Estiati, I., Lopez, G., Saldarriaga, J. F., Aguado, R., Bilbao, J., Olazar, M. Fountain confined conical spouted beds. *Powder Technology*, 312, 334-346 (2017).

Amasorrain, A. Eraikuntzarako materialen lehorketarako iturri-ohantze koniko aldatua. Ikerketa hidrodinamikoa. Gradu amaierako lana, UPV/EHU (2005).

Baeyens, J., Geldart, D., Wu, S. Y. Elutriation of fines from gas fluidized beds of Geldart A-type powders-effect of adding superfines. *Powder Technol.*, 71, 71-80 (1992).

Bilbao, J., Olazar, M., Romero, A., Arandes, J.M., Design and operation of a jet spouted bed reactor with continuous catalyst feed in the benzyl alcohol polymerization. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 26(7), 1297-1304 (1987).

Bilbao, J., Olazar, M., Arandes, J. M., Romero, A.. Optimization of the operation in a reactor with continuous catalyst circulation in the gaseous benzyl alcohol polymerization, *Chem. Eng. Commun.*, 75, 121 (1989).

Bridgwater, J. Spouted Beds. In J.F. Davidson, R., Clift, D. Harrison, *Fluidization, vol II* (p.201). London: Academic Press (1985).

Briens, C. L., Bergougnou, M. A., Inculet, I. I., Baron, T., Hazlett, J. D. Size distribution of particles entrained from fluidized beds: Electrostatic effects. *Powder Technol.*, 70, 57-62 (1992).

Cortazar, M., Lopez, G., Alvarez, J., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M. Advantages of confining the fountain in a conical spouted bed reactor for biomass steam gasification. *Energy*, 153, 455-463 (2018).

Estiati, I. Ohantzea egonkortzeko gailuz hornitutako iturri ohandze konikoen hidrodinamika. Doktorego Tesia, UPV/EHU (2017).

Gishler, P.E., Mathur, K.B. Patente U.S.A. n° 2786280 (1957 a).

Gishler, P.E., Mathur, K.B. Patente G.B. n° 801315 (1957 b).

Ishikura, T., Nagashima, H., Ide, M., Hydrodynamics of a Spouted Bed with a Porous Draft Tube Containing a Small Amount of Finer Particles. *Powder Technol.*, 131, 56-65 (2003).

Kmiec, A., Leschonski, K., Analysis of two-phase flows in gas – solids injectors, *Chem. Eng. J.*, 45, 137 (1991).

Krambrock, W. Mixing and homogenizing of granular bulk material in a pneumatic mixer unit. *Powder Technol.*, 15, 199-206 (1976).

Kucharski, J., Kmiec, A., Hydrodynamics, heat and mass transfer during coating of tablets in a spouted bed, *Can. J. Chem. Eng.*, 61, 435 (1983).

Kucharski, J., Kmiec, A. Kinetics of granulation process during coating of tablets in a spouted bed. *Chem. Eng. Sci.*, 44, 1627-1636 (1989).

Kunii, D., Levenspiel, O. Entrainment of solids from fluidized beds I. Hold-up of solids in the freeboard II. Operation of fast fluidized beds. *Powder Technol.*, 61, 193-206 (1990).

Leva, M., "*Fluidization*", Mc Graw Hill: New York (1959).

Llamosas, R. Estudio de Propiedades Locales en Spouted Beds. Aplicación al Tratamiento de Serrín y Residuos de Madera. Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, Bilbao, 1996.

Lopez, G., Cortazar, M., Alvarez, J., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M. Assessment of a conical spouted with an enhanced fountain bed for biomass gasification. *Fuel*, 203, 825-831 (2017).

Ma, X., Kato, K. Effect of interparticle adhesion forces on elutriation of fine powders from a fluidized bed of a binary particle mixture. *Powder Technol.*, 95, (2) 93-101 (1998).

Mathur, K.B., Gishler, P.E., A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying, *J. Appl. Chem.*, 5, 624 (1955 a).

Mathur, K.B., Gishler, P.E., A technique for contacting gases with coarse solid particles, *AIChE J.*, 1, 157 (1955 b).

Mathur, K.B., Epstein, N. Dynamics of Spouted Beds. *Adv. Chem. Eng.*, 9, 111 (1974).

Nagashima, H., Ishikura, T., Ide, M. Effect of the tube shape on gas and particle flow in spouted beds with a porous draft tube. *Can. J. Chem. Eng.*, 87, 228–236 (2009).

Nakazato, T., Li, J., Kato, K. Effect of cohesive powders on the elutriation of particles from a fluid bed. *Chem. Eng. Sci.*, 59, 2777-2782 (2004).

Olazar, M., San José, M. J., Aguayo, A. T., Arandes, J. M., Bilbao, J. Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 31, 1784-1791 (1992).

- Olazar, M., San José, M. J., Peñas, F. J., Aguayo, A. T., Arandes, J. M., Bilbao, J. A model for gas flow in jet spouted beds. *Can. J. Chem. Eng.*, 71, 189-194 (1993).
- Olazar, M., Arandes, J. M., Zabala, G., Aguayo, A. T., Bilbao, J. Design and operation of a catalytic polymerization reactor in a dilute spouted bed regime. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36, 1637-1643 (1997).
- Olazar, M., San José, M.J., Aguado, R., Gaisán, B., Bilbao, J. Bed voidage in conical sawdust beds in the transition regime between spouting and jet spouting. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38, 4120-4122 (1999).
- Olazar, M., San José, M.J., Alvarez, S., Morales, A., Bilbao, J. Design of conical spouted beds for the handling of low-density solids. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 655-661 (2004).
- Pablos, A., Aguado, R., Tellabide, M., Altzibar, H., Freire, F.B., Bilbao, J., Olazar, M. A new fountain confinement device for fluidizing fine and ultrafine sands in conical spouted beds. *Powder Technol.*, 328, 38-46 (2018).
- Passos, M.L., Mujumdar, A.S., Raghavan, V.G.S. Spouted beds for drying: Principles and Design Considerations. *Advances in Drying*, Ed. A.S. Mujumdar, Vol. 4, p. 359, *Hemisphere Publishing Corp.* Washington (1987).
- Patrose, B., Caram, H. S., The mechanics of particle motion in a grid jet, *AIChE J. Symposium Series*, 80, 48 (1984).
- Peñas, F. J., Contribución al Modelado del Flujo en "Spouted Bed" Cónicos. Aplicación al Tratamiento de Mezclas y Estudio de la Segregación, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, Bilbao, 1993.
- Robinson, C. E., Estatu Batuak. Patente zkoa.: 212508 (1879).
- Saldarriaga, J. F., Atxutegi, A., Aguado, R., Altzibar, H., Bilbao, J., Olazar, M. Influence of contactor geometry and draft tube configuration on the cycle time distribution in sawdust conical spouted beds. *Chem. Eng. Res. Des.*, 102, 80-89 (2015).
- Saldarriaga, J. F., Aguado, R., Altzibar, H., Atxutegi, A., Bilbao, J., Olazar, M. Minimum spouting velocity for conical spouted beds of vegetable waste biomasses. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 60, 509-519 (2016).
- Saldarriaga, J. F., Aguado, R., Atxutegi, A., Bilbao, J., Olazar, M. Kinetic modelling of pine sawdust combustion in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 227, 256-266 (2018).
- San José, M.J. Regímenes de operación en spouted beds cónicos. Condiciones de estabilidad y fluidodinámica. Tesis doctoral, UPV/EHU (1991).
- San José, M.J., Olazar, M., Aguayo, A. T., Arandes, J. M., Bilbao, J. Expansion of spouted beds in conical contactors. *Chem. Eng. J.*, 51, 45-52 (1993).
- San José, M.J., Alvarez, S., Ortiz de Salazar, A., Olazar, M., Bilbao, J. Influence of the particle diameter and density in the gas velocity in jet spouted beds. *Chemical Engineering and Processing*, 44, 153-157 (2005).

Santamaria, L., Lopez, G., Arregi, A., Amutio, M., Artetxe, M., Bilbao, J., Olazar, M. Influence of the support on Ni catalysts performance in the in-line steam reforming of biomass fast pyrolysis derived volatiles. *Applied Catalysis B: Environmental*, 229, 105-113 (2018).

Tamir, A., Kitron, Y., Vertical impinging-stream and spouted-bed dryers. *Drying Technol.*, 7, 183 (1989).

Uemaki, O., Mathur, K.B., Granulation of Ammonium Sulfate Fertilizer in a Spouted Bed. *Ind. Eng. Chem.*, 15, 504 (1976).

Wang, S., Liu, Y., Liu, Y., Wei, L., Dong, Q., Wang, C., Simulations of flow behavior of gas and particles in spouted bed with a porous draft tube. *Powder Technol.*, 199, 238 (2010).

Zabala, G., *Polimerización Catalítica en Spouted Bed Cónico*, Tesis doctoral, UPV/EHU (1997).

Zabrodsky, S. S., "*Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds*", MIT Press, Cambridge, Massachussets, (1966).