

Ura garbitzeko mintzak: funtzionamendua eta lortzeko era

(Membranes for water remediation: operation mechanism and obtention)

Peio Martinez eta Antonio Veloso-Fernández*


Kimika Fisikoa Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea FCT/ZTF,
Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU

LABURPENA: Munduan zehar aurkitzen den arazo larrienetarikoa edateko uraren gabezia hedatuz doala da, hainbat kutsatzailek eraginda. Mintzen garapena premiazkoa da askotariko ur-eskuragarritasuneko egoeretan kutsatzaileen kudeaketa aurrera eramateko. Garbiketa-mekanismo bakoitzaren arabera (taminaren arabeko bereizketa edo adsortzioa) material batzuk erabiliko dira, oro har polimeroak edo zeramikak. Modu honetan, prozesatze-metodo asko garatu dira material eta baldintzen arabera. Alde batetik, zeramikak zurrinak eta kimikoki geldoak direnez gero, haien prozesatzea zein erabilera muturreko egoeretarako dira egokiak. Beste alde batetik, polimeroak disolbagarriak direnez eta tenperaturarekin biguntzeko gaitasuna dutenez, egoera leunagoetan manceiatu behar dira. Lan honetan, ura garbitzeko erabiltzen diren mintzen ezaugarri orokorrak aurkeztu dira; hau da, kutsatzaileak kentzeko erabiltzen diren mekanismo fisiko edo/eta kimikoak, mintz bat eratzeko prozesatze-teknikak eta sortzeko material bakoitzaren propietateak.

HITZ GAKOAK: edateko ura, mintzak, kutsatzaileak, polimeroak, zeramikak, adsortzioa, iragazketa.

ABSTRACT: *The diminishing amount of drinking water across the world due to different pollutants is one of the most worrying problems nowadays. The development of membranes is preferential given their ability to deal with pollutants in various aquatic medias, through a selection of mechanisms (size exclusion and adsorption) appropriate materials can be chosen, usually polymers or ceramics. Thus, many processing methods have been developed according to materials and requirements. On the one hand, ceramics are resistant and chemically stable, making their processing and usage focused on extreme conditions. On the other hand, polymers being soluble and able to soften under high temperature are processed and used in moderate conditions. This work presents the general characteristics of membranes used for water remediation, that is, physical and/or chemical mechanisms used to remove contaminants, the processing techniques to form a membrane and the properties of different materials to form them.*

KEYWORDS: *drinking water, membranes, pollutants, polymers, ceramics, adsorption, filtration.*

* **Harremanetan jartzeko/Corresponding author:** Antonio Veloso Fernández, Kimika Fisikoa Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea FCT/ZTF, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Sarriena auzoa z/g, 48940, Leioa, Bizkaia.  <https://orcid.org/0000-0003-1309-2373>, antonio.veloso@ehu.eus

Nola aipatu/How to cite: Martinez, Peio; Veloso-Fernández, Antonio (2025). «Ura garbitzeko mintzak: funtzionamendua eta lortpena», *Ekaia*, 47, 2025, 205-220. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.26141>).

Jasoa: maiatzak 15, 2024; Onartua: uztailak 11, 2024

ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © UPV/EHU Press



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

Ura bizitza- eta giza aktibitaterako beharrezkoa den baliabidea da, zeinaren gabezia egunero handitzen den kutsaduragatik, edo, herrialde txiroenetan, hura arazteko baliabide faltagatik. Arazo honen aurreko konponbide nagusia uretan dauden edo bertan isuriko lirakekeen kutsatzaileak kudeatzea da. Horretarako metodorik egokiena izango da etekin altuaz, modu selektiboan eta azpi-produktu kantitate gutxien sortuz operatzen duena. Modu honetan, uraren tratamendua hiru fasetan ezberdintzen da: primarioa, sekundarioa eta tertziarioa. Fase primarioan solidoak eta olioak kudeatzen dira sedimentazio-prozesuen bitartez; fase sekundarioan bakterioak erabiltzen dira materia organikoa metabolizatzeko eta uretatik kentzeko; fase tertziarioan uretan geratu diren solidoak eta konposatu disolbatuak kudeatzen dira. Azkenengo fase honetan tratatzen diren kutsatzaileak ugariak eta askotariko motetakoak dira, eta hainbat prozesu erabili behar izaten dira aukera guztiak barneratzeko; handia da, hortaz, eskatzen duten baliabide kopurua zein denbora [1]. Arazo honi konponbidea emateko, mintzen erabilpenean pentsatu da fase honetarako, mintzak hainbat material, prozesatze eta formatara egokitu baitaitezke, behar diren propietate eta kutsatzailen arabera [2].

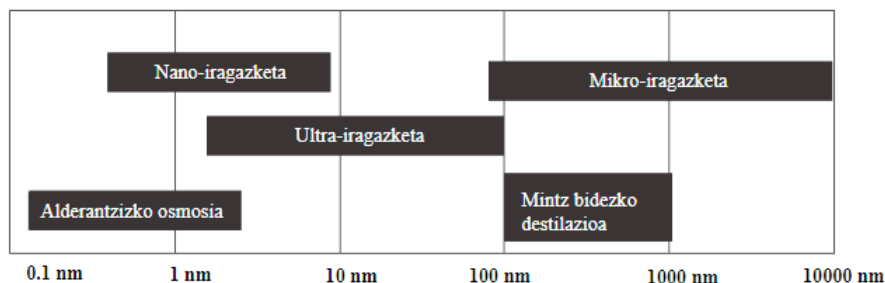
Kutsatzailen sailkapen eta mota anitz daudelarik, ez da erraza mekanismo edo kalte moten bilduma orohartzailea osatzea fenomeno honen aurrean, baina duten izaera kimikoa kontuan izanik, kutsatzailak sedimentu, organiko eta ez-organiko modura sailka daitezke. Sedimentuak kimikoki geldoak diren partikula edo agregatu solidoak dira, baina organismoaren barruan oztopo fisikoak jar ditzakete; adibidez, odol-jarioaren moteltzea edo arnas-bideen estaltzea. Halakoak tamainaren bitartez ken daitezke selektiboki. Kutsatzaile organiko zein ez-organikoei dagokienez, kimikoki erreaktiboak dira eta mintzarekin sortzen duten elkarrekintza kimikoek modu errazean kentzea ahalbidetzen dute. Organikoen kasuan, konposatu karbonodunak dira, eta ez-organikoei metal astunak, gatzak eta metalen bestelako konposatuak barneratzen dituzte [3]. Modu honetan, nahiz eta taldeen barruan askotariko mekanismoak agertu, talde bakoitzak antzeko propietate kimiko eta fisiko orokorrak erakusten ditu, eta posible egiten du garbiketa selektiboa mintzen bidezko zenbait prozesamenduren bitartez.

Kutsatzailak ingurune likidotik kanporatzeko dagoen aukerarik egokiena mintzak dira. Mintza fluido batean murgilduta dagoen geruza porotsu modura defini daiteke, zenbait fenomenoren bitartez (osmosia, dialisia...) hainbat konposaturen kontzentrazio-aldaketa selektiboa ahalbidetzen duena. Horrela definituz, mintzek bi ezaugarri interesgarri erakusten dituzte. Alde batetik, fluido batean egon daitezkeen partikulak edota kutsatzailak kentzeko gaitasun moldagarria dute eta, beste alde batetik, aukera ematen dute poroen propietateak beharrezkoak diren ezaugarrietara egokitzeko.

Lan honetan mintzen ezaugarri orokorrak eta materialarekin zein prozesatzearekin duten lotura orokorra azalduko dira, baita mintzek duten funtzionamenduaren oinarria. Horretarako, lehenik mintzen ezaugarri orokorrak azalduko dira; ondoren, garbiketa aurrera eramateko mintzek erabiltzen dituzten mekanismoak azalduko dira eta, azkenik, material bakoitzak dituen propietateak eta mintz bat sortzeko nola prozesatu daitezkeen azalduko da.

2. MINTZEN EZAUGARR OROKORRAK

Mintzen osagaiak edo prozesatzea edozein delarik, guztiek jarraitzen dituzte bi prozesu jakin: tamainaren arabera bereizketa eta adsortzioa. Bi mekanismoak poroetan gertatzen diren prozesuetan oinarritzen dira, poroek mintzari eta haren talde kimikoei azalera gehiago ematen baitiete gune aktiboak sortuz, baina jokabide bat baino gehiago jarraitzen dute. Tamainaren arabera bereizketa poroaren diametroan oinarrituta egiten da: hura baino handiagoak diren konposatuek ez dute mintza zeharkatzen. Poroaren tamainaren arabera bost prozesu mota bereizten dira: mikro-, ultra- eta nano-iragazketak, mintz bidezko destilazioa eta alderantzizko osmosia (**1. irudia**) [4]. Adsortzioan, aldiz, bi kasu ezberdindu daitezke: fisisortzioa eta kimisortzioa. Lehenengo kasuan, mintzaren eta konposatuaren arteko indar fisikoek (hidrogeno-zubiak edo ioi-ioi elkarrekintzak, adibidez) eragozpenak sortzen dituzte. Bigarren kasuan, mintzaren eta konposatuaren arteko erreakzio kimiko bat gertatzen da kutsatzaileen adsortzio espezifikoak eta etekin altua ahalbidetzen dituen, baina mintzaren berrerabilpena mugatuz [5].



1. irudia. Mintzaren poro-tamainaren arabera bereizketa-prozesuak.

Bestalde, adsortzioan eragin handiena duen parametroa mintzaren materiala da, hura baita elkarrekintza mota eta sendotasuna zehazten dituen eta, beraz, selektibitatea eta etekina baldintzatzen dituen. Materialei dagokienez, polimeroak dira erabilienak: haien sintesi-prozesuan nahi diren propietate fisiko-kimikoak aldatzeko eta optimizatzeko aukera ematen

teaz gain, beste mota batzuetako konposatuak (*filler* edo karga deiturikoak) gehitzeko gaitasuna dute eta modu horretan propietate zehatz bat eman ahal zaie. Erabiltzen diren kargen artean, ohikoa da Titanio (IV) oxidoaren nanopartikulak gehitzea. Partikula hauek argiaren bidezko degradazioa kataliza dezakete mintzean geratzen diren bakterioak edo konposatu organiko kutsakorrek degradatzeko [6]. Erabiltzen den beste material bat zeramikak dira: tenperatura altuetan eta muturreko ingurune kimikoetan erabiltzeko aukera ematen dute (pH oso altuak zein baxuak edo ingurune oxidatzaile sendoak, adibidez), baina duten prezio altua eta birziklatzeko zailtasuna eragozpen handiak dira haien alde egiteko [7]. Gaur egun garatzen ari diren aukeren artean daude material nano-egituratuak, ezagunenak direlarik grafeno edota karbonozko nano-tutuak. Material hauek matrize zurrun batean zehar barreiatzen dira mintza sortzeko, eta tamainaren arabera bereizketan selektibitate oso handia erakusten dute, uraren bidean oztoporik ia jartzen ez duten bitartean [8], baina ez dira artikulatu honetan landuko, berrikuntza direlako; modu berean aipatzekoak dira nanopartikulak barneratzen dituzten mintzak eta azaleko egitura nano-morfologia kontrolatua dutenak: elkarrekintza espezifikoak bultzatzen dituzte material hauek, esaterako hidrofobia eta metal astunen harrapaketa.

Mintzaren materiala erabaki ondoren, poroen tamaina, distribuzioa eta interkonexio mailari buruzko informazioa zehazten da. Ezaugarri hauek prozesatzearen bitartez aldatzen dira materialaren propietateen arabera, baina gainera, erabili ahal den prozesatzea mugatuta dago materialaren eta beraren *filler*-en arabera. Polimeroak esaterako, konposatu organikoak direnez gero, ezin dira tenperatura altuegietan erabili degradatu gabe, eta, gainera, propietate mekaniko mugatuak dituztenez, egoera diluitu edo bigun batetik hasi behar da haien prozesatzea [9]. Zeramiken kasuan, disolbatzeko gaitasun murrizta eta zurruntasun altua dutenez gero, beren hautsen suspentsiotik prozesatzen dira [10]. Hala ere, lehen eman behar den pausoa mintza oinarrituko den garbiketa-mekanismoa erabakitzea da, horrek baldintzatzen baititu erabil daitezkeen materialak eta, beraz, prozesatzeak. Horiek horrela, hurrengo paragrafoetan tamainaren arabera bereizketak-prozesuak eta adsortzio-prozesua azalduko dira labur, eta, ondoren, mintz bat prozesatzeko ohiko metodoak azalduko dira.

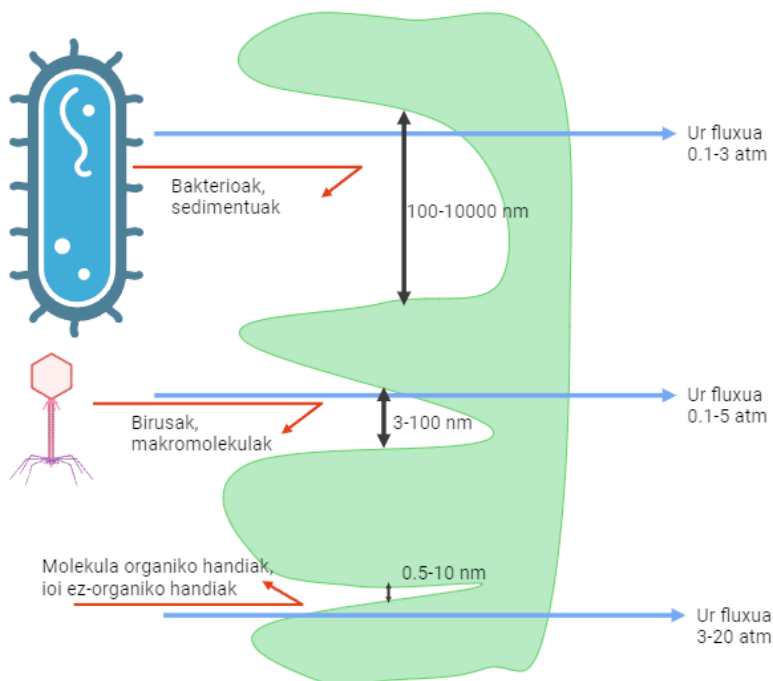
2.1. Tamainaren arabera bereizketak-prozesuak

2.1.1. Nano-, ultra- eta mikro-iragazketak

Iragazketak prozesu fisikoak dira, non ur-fluxu baten aurrean mintza jarri eta tamaina handiko partikula edo konposatuak atzean geratzen diren, ura garbitzeko. Prozesu hau presiopekoa dela esaten da, ur-fluxuak sortzen duen presioa baita prozesua aurrera eramateko behar den indar eragilea. Ur-presioa desagertuz gero ez litzateke garbiketarik lortuko. Hiru iragaz-

keta mota daude: nano-iragazketa, ultra-iragazketa eta mikro-iragazketa. Hiruretan prozesua sinplea eta berdina da, eta poro-tamaina dute ezberdintasun bakarra. **2. irudian** laburbiltzen dira hiru iragazketak. Mintzaren poro-tamaina 100-10000 nm denean mikro-iragazketa gertatzen da, bakterioak eta sedimentuak iragazteko gai den iragazketa; tamaina 3-100 nm-ra jaistean ultra-iragazketa da: birusak eta makromolekulak geratzen dira atzean iragazketa horretan; azkenik, poro-tamaina 0.5-10 nm-ra heltzean, nano-iragazketa dugu, molekula ez-organiko eta organiko handiak iragazteko gai den iragazketa [11].

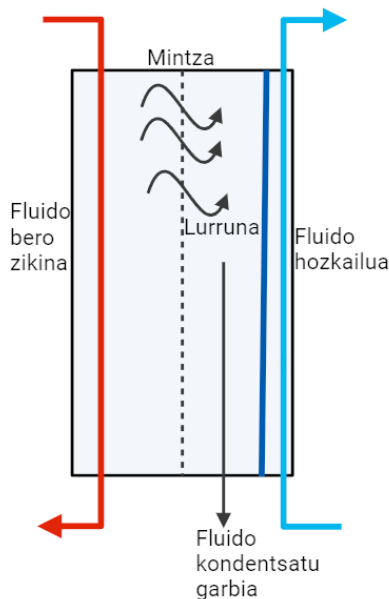
Poroen tamaina txikitzen denean, mintzaren molekulen arteko distantzia txikitzen da, eta bi fenomeno dakartza berarekin distantzia-txikitze horrek. Alde batetik, mintza zeharka dezaketen konposatuen tamaina mugatzen da. Beste alde batetik, uraren mugimendua oztopatuago dago mintzean zehar eta presio handiagoa behar da prozesua aurrera eramateko. Hori garrantzizkoa da energia-kontsumoaren eta mintzaren propietate mekanikoen aldetik: presioa handitu behar izanak energia-kostu altuago bat dakar, bai eta mintza apurtzeko arrisku handiagoa.



2. irudia. Iragazketa-prozesu moten ezaugarri laburbilduak. Berdez mintza adierazten da, poro-tamaina bakoitza erakusteko. Gezi urdinek uraren fluxua adierazten dute, beharrezkoa den presioarekin batera. Gezi laranja mintzaren arabera bereizitako kutsatzaileak adierazten dituzte.

2.1.2. Mintz bidezko destilazioa

Kasu honetan erabiltzen den indar eragilea tenperatura da, disolbatzailearen likido-gas oreka bultzatzeko. Mintz iragazgaitza paraleloki kokatzen da garbitu nahi den fluxu beroarekin, haren beste aldean dagoelarik kondentsazio-puntu edo gas-garraio sistema bat. Modu horretan lurrin garbiak mintza zeharkatzen du eta atzean geratzen da likido zikina [12,13], **3. irudian** ikusten den moduan.

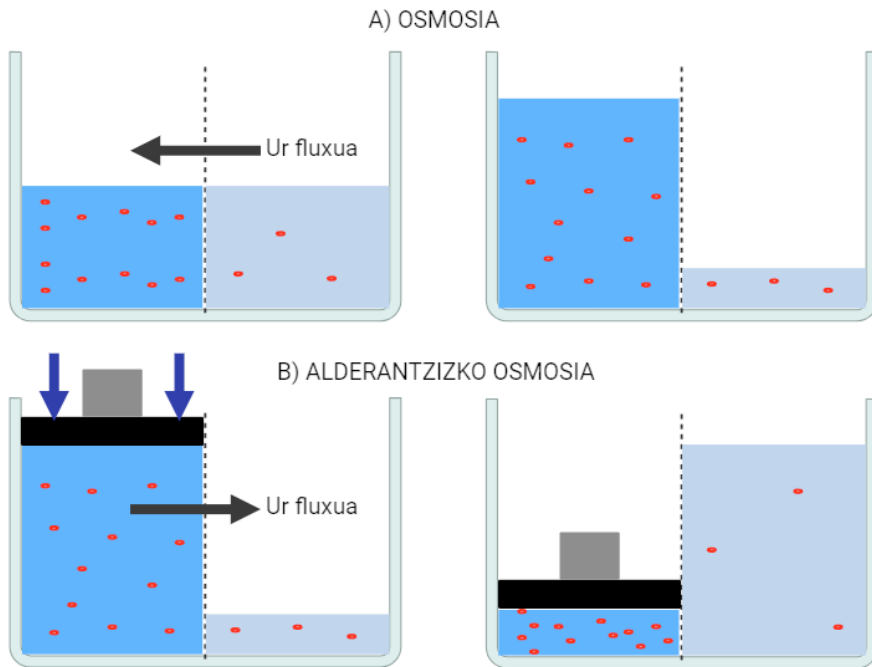


3. irudia. Mintz-bidezko destilazioaren irudi eskematikoa. Mintzaren alde batean, garbitu nahi den ura berotzen da, haren lurrinak mintza zeharkatzen du eta beste aldean dagoen ingurune hotzean kondentsatzen da.

2.1.3. Alderantzizko osmosia

Prozesu hau ulertzeko, lehenik osmosia ezagutu behar da. Fenomeno horretan mintz erdi-iragazkor batek solutu-kontzentrazio ezberdinak dituzten bi fase urtsu banatzen ditu; ondoren eta kontzentrazio-ezberdintasunak bultzaturik, ura kontzentrazio baxuena duen fasetik altuena duenera mugituko da mintzean zehar, bi faseen kontzentrazioa berdindu arte [14]. Aldaketa horrek presio osmotiko deitzen den indar bat sortzen du; hau da, mintzaren bi aldeetan kontzentrazio bera mantentzeko urak mintzaren kontra sortzen duen indarra, zuzenki proportzionala hasieran zegoen kontzentrazio-ezberdintasunarekin [15] (**4A. irudia**). Prozesu hau modu naturalean gertatzen da zeluletan, beren barruan metatzen diren gatz eta metabolitoen

kontzentrazioa kontrolatzeko. Alderantzizko osmosian konposatu organiko eta ez-organiko disolbatuen kontzentrazio altua duen ura presiopean jartzen da poro nanometrikoak (0.3-4 nm) dituen mintz baten kontra. Modu honetan, mintzaren alde batean kontzentrazioa igotzen den bitartean, beste aldean ur garbia metatzen da, osmosi prozesu naturalaren kontra joanik eta hark sortzen duen presio osmotikoa gaindituz [16], **4B. irudian** laburtzen den moduan.



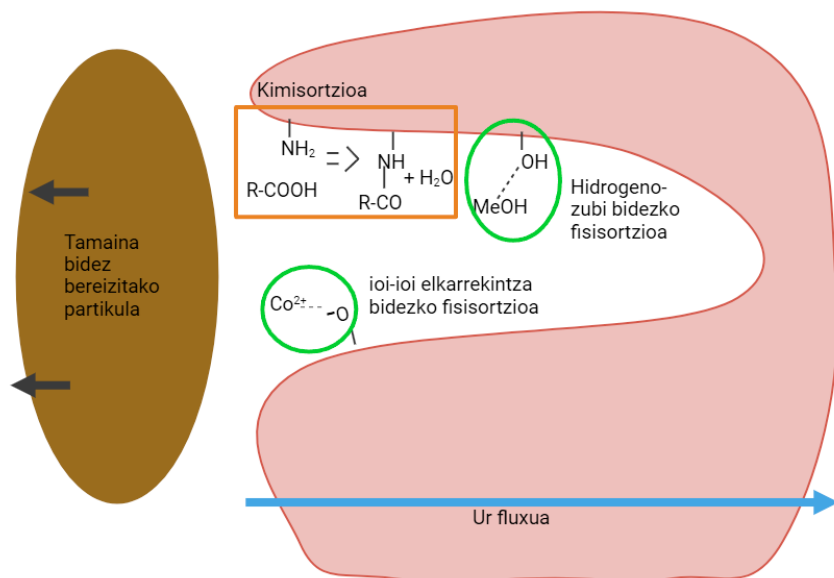
4. irudia. (A) Osmosiaren eta (B) alderantzizko osmosiaren adierazpen eskematiakoak. Biribil gorriak solutuak dira; urdinez eta grisez, ur zikin eta garbiak hurrenez hurren, eta marra etenez mintzak.

2.2. Adsortzio-prozesua

Behin tamainaren bidezko eskusioa ikusirik, zehaztasun handiagoa duen adsortzio-prozesuei begiratu diegu. Materialaren propietate kimikoen arabera agertzen diren indarren bidez sortzen dira eta tamainaren arabera sailkatu beharrean elkarrekintza moten arabera sailkatzen dira. Aipatu den moduan, sailkapen orokorra fisisortzioa eta kimisortzioa bereiztea da, eta bata edo bestea erabiltzen da esku artean den zereginaren arabera. Bien arteko ezberdintasunak ulertu behar dira hautaketaren zergatia ulertzeko.

Fisisortzioa indar fisikoen bitartez gertatzen da; zehatzago esanda, gorputzen arteko erakarpen-indarrek eraginda. Mota honetan ohikoenak diren fenomenoak hidrogeno-zubiak eta ioien arteko erakarpenak dira. Lehenengo kasuan, oxigeno eta nitrogenodun konposatu polarrak erakartzen dira, eta, bigarren kasuan, kontrako zeinua duten ioiak erakartzen dira. Elkarrekintza hauen indarra lotura kimiko batena baino askoz txikiagoa denez gero, erraz alderantzizka daitezke termikoki edo kimikoki. Beraz, berrerabil daitezke eta konposatu-espektro zabalerako balio dute. Hala ere, espezifikotasun zein etekin aldetik arazoak sortzen dira [17].

Kimisortzioaren kasuan, konposatueta indar kimiko batek eragiten du mintzean zehar dauden talde kimikoekin erreakzionaraztea eta lotura bat sortzea [17]. Erreakzio kimikoetan parte hartzen duten talde bakoitzeko espezifikoa direnez, prozesu honetan oinarritzen diren mintzek gaitasun handia izan ohi dute konposatu zehatzak bereganatzeko, eta eraginkortasun handiz kentzen dituzte uretatik konposatu mota gutxi batzuk [18]. Elkarrekintza sendo hauek gertatzean murriztu egiten da berrerabilpena: muturreko baldintzak behar dira hasierako egoerara bueltatzeko, eta mintzaren egitura azkar degradatzen da. **5. Irudian**, mintzetan gertatzen diren prozesuak laburbildu dira: berdez adierazi dira ohikoenak diren fisisortzioak (hidrogeno-zubi eta ioi-ioi elkarrekintza bidezkoa) eta laranja kimisortzioaren adibide bat (amina eta azido baten erreakzioa amida talde bat sortzeko).



5. irudia. Mintzetan gertatzen diren prozesuen irudi eskematikoa, non tamainaren arabera bereizketa (partikula marroia), eta fisisortzio (biribil berdeak) eta kimisortzio (karratu laranja) prozesuen adibideak erakusten diren.

3. PROZESATZE-METODOAK

Materialen propietate orokorrak aipatu ondoren eta mintzean gertatzen diren prozesuak ezagutu ditugularik, haiek nola lortzen diren azaldu behar da, porositatea eta bere ezaugarriak baldintzatzen dituen parametro garrantzitsuenetarikoa baita. Zeramikak eta polimeroek ezaugarri fisiko oso ezberdinak dituzte, eta beren prozesatzeak ezaugarri ezberdinetan oinarritzen dira. Zeramikak, zurrinak, kimikoki geldoak eta fusio-puntu oso altukoak direnez gero, hauts moduan edo sintesi zuzenaren bidez prozesatu behar dira [9]. Polimeroak, aldiz, oro har hainbat disolbatzailetan disolba daitezke eta beira-trantsizio tenperatura deituriko propietatea dute, non egoera solidoaren eta likidoaren arteko propietateak dituzten; hau da, solido fluido edo likido zurrin modura deskriba daitekeen izaera hartzen dute. Horregatik disoluzioan edo tenperatura altuetan prozesatu behar dira [10].

3.1. Mintz zeramikoen prozesatzea

3.1.1. Suspentsioaren bidezko prozesatzea

Zeramiken geldotasun kimikoa kontuan izanik, haiei forma emateko metodarik ohikoena hautsen suspentsiotik hastea da. Hainbat teknikaren bidez egin daiteke, baina antzeko eskema jarraitzen dute guztiek: hautsak suspentsio likidoan jarri ondoren, behar den forma duen molde edo mekanismo batean sartzen dira. Hor likidoa pixkanaka kanporatuz trinkotu egiten da hautsa eta, azkenik, tenperatura altuko tratamendu bat ezartzen da, non partikula txikienak besteen artean kokatzen diren egitura solido oso bat sortzeko. Teknika bakoitzaren bidez mintzaren lodiera bat edo bestea sortzen da, poroen kantitatea eta tamaina likido motaren zein hauts/likido erlazioaren arabera aldatzen duten bitartean [19]. Metodo hau da aurrera eramaten errazena, presioak, tenperatura altuak edota likidoa xurgatzen duen molde porotsu bat erabiltzeak produktua era industrialean lortzea sinplifikatzen du, suspentsio kantitate handiak prestatu daitezke, eta, molde-serie baten bidez, produktu kantitate handiak aldi berean sortu; metodo honen desabantaila poroen eta homogeneitatearen kontrola baxua izatea da.

3.1.2. Erreakzio zuzenaren bidezko prozesatzea

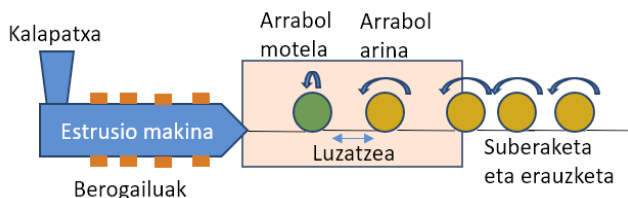
Metodo hau jarraituz lortzen diren mintzek xafla forma izaten dute. Zeramika zuzenean gatzetatik sintetizatzen denez, oso zaila da beste forma batzuk ematea, baina onura modura, poroen ezaugarriak manipulatzeko aukera hobek ematen ditu suspentsio-metodoak baino. Talde honetan hiru teknika agertzen dira: egoera solidoko prozesatzea, sol-gel metodoa eta baporearen bidezko deposizio kimikoa. Hiruren eskema antzekoa da: zeramika sortzen duten gatzak nahasi eta tenperatura altuen bitartez haien arteko erreakzioa bultzatzen da, zeramika-xafla porotsu bat sortzeko. Aldatzen den gauza ba-

karra erreakzio-ingurunea da. Egoera solidoan, gatzak zuzenean nahasi eta labean sartzen dira [20]. Sol-gel metodoan, gatzak disolbatu ondoren, zera-mikaren konposatu nagusien koloideak sortu eta, tenperatura altuen bidez, erreakzioa eta disolbatzailearen kanporaketa bultzatzen dira [21]. Azkenik, baporearen bidezko metodoa gatzaren sublimazioan eta tenperatura altuen bidezko oxidoen eraketan oinarritzen da [22].

3.2. Mintz polimerikoen prozesatzea

3.2.1. Luzatzea

Metodo hau beira-trantsizioan oinarritzen da: erabili nahi den polimeroa egoera solidoan kalapatxatik estrusio makinara sartzen da, eta hark dituen berogailuek polimeroa urtzen dute. Polimeroa estrusio-makinatik forma erabilgarria hartuta ateratzen da; ondoren, beira-trantsizio eta urtze-tenperatura tartearaino hozten da luzatzea aurrera eramateko; horretarako, abiadura ezberdina duten bi arrabol erabiltzen dira; modu horretan polimero bigunduak tentsio kontrolatuak jasaten ditu, eta, haiek sortzen dituzten indarren ondorioz, mikro-hausturak (poroak) lortzen dira. Azkenik, suberaketa deituriko prozesua jarraitzen da, non mintz porotsua motelki hozten den erauzten den bitartean (**6. irudia**) [23]. Teknika hau aurrera eramateko garrantzizkoa da materialaren propietate termiko eta mekanikoen arteko erlazioa ezagutzea, ezaugarri mugatzailea tenperaturarekin aldatzen den plastikotasuna baita; alegia, forma mantentzeko gaitasuna. Metodo hau oso erabilia da beira-trantsizio baxukoak eta disolbatzen zailak diren polimeroekin lan egiteko; adibidez, polietilenoa, polipropilenoa edota tefloia [4,24]. Prozesu honek duen desabantaila nagusia poroen tamainaren zein distribuzioaren kontrol baxua da, baina metodo hau jarrai dezaketen polimeroak kantitate eta abiadura handietan prestatu ahal dira, mintzaren lodieraren kontrol oso ona lortuz aldi berean.

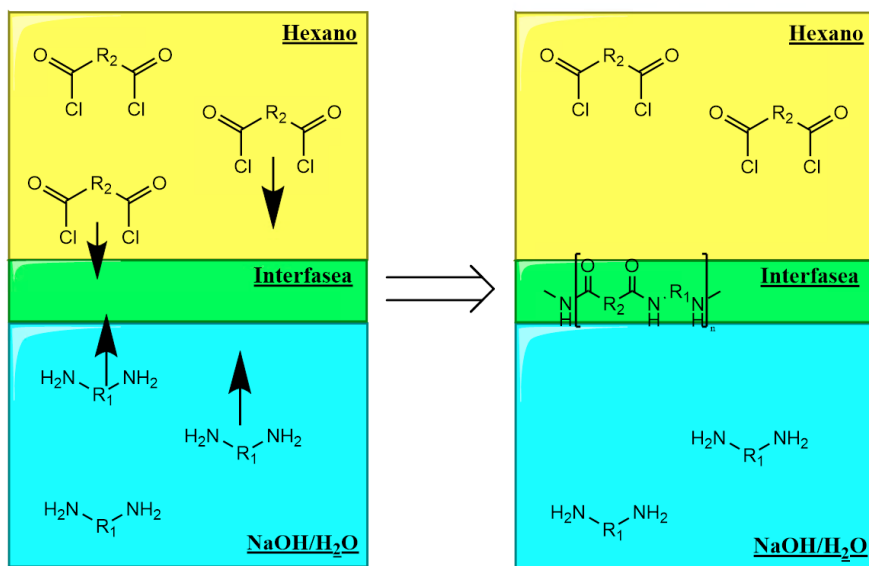


6. irudia. Luzapenaren bidezko prozesatzea gauzatzeko behar den eraketa modu eskematikoan.

3.2.2. Interfaseko polimerizazioa

Kasu honetan aldiberekoak dira mintzaren eta polimeroaren sorrera. Polimeroa sortzeko behar diren erreaktiboak banaturik disolbatzen dira disolbatzaile ezberdinetan. Disolbatzaileek bi propietate bete behar dituzte:

alde batetik, beren artean nahastezinak izan behar bute, eta horrek interfase bat sortzeko gaitasuna ematen du; beste alde batetik, sortzen den polimeroak disolbaezina izan behar du bietan; horrela mintza zuzenean sortzen da interfasean bertan [25]. Metodo honen bitartez mintz meheak sortzen dira, eta kontzentrazioak eta disolbatzaileak aldatuz manipulatua egin daitezke mintzaren ezaugarri fisiko guztiak [26]. Teknika honen erabilpen nabariena Nylon-aren sintesia da (**7. irudian** erakusten da): sodio hidroxido disoluzio batean amina taldeak dituzten kateak disolbatzen dira; ondoren, azil haluro taldedun kateak dituen eta nahasezina den hexanoarekin kontaktuan jartzen da soluzioa, eta Nylon mintza sortzen da beren arteko interfasean [27]. Metodo oso sinplea da hau produktuaren azalera handiak lortzeko, baina zailtasunak dakartza mintzaren lodiera eta homogeneitatea kontrolatzeko.

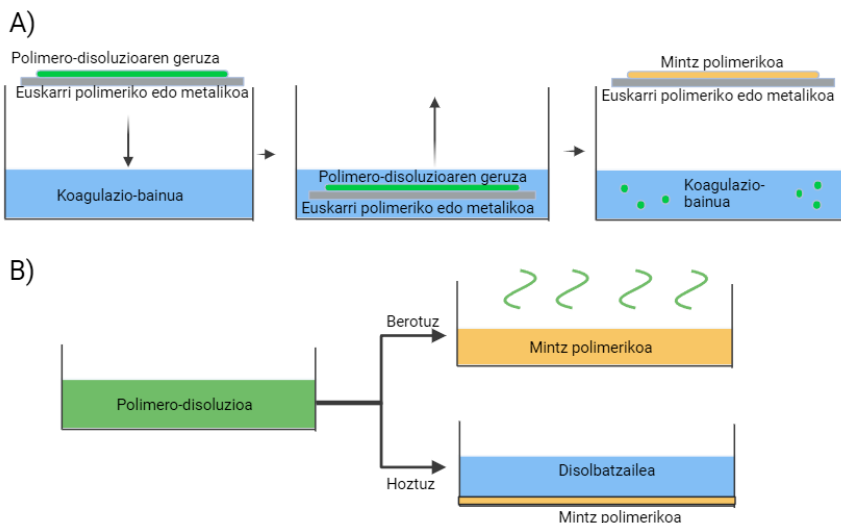


7. irudia. Interfase bidezko prozesatzearen adibide eskematikoa. Nylon-aren sorrera, hexanoaren (hori kolorez) eta sodio hidroxido disoluzioaren (urdin kolorez) arteko interfasean (berdez).

3.2.3. Fase-aldaketa

Prozedura hau oreka kimiko edo termikoaren apurketaren bitartez egin daiteke, disolbatzaile-inbertsio edo tenperatura-inbertsio modura ezagutzen diren metodoen bitartez, hurrenez hurren. Bi kasuetan polimeroa disolbatu-rik hasten da, ondoren bat-bateko prezipitazioa eraginik. Disolbatzaile-inbertsioaren kasuan (**8A. irudia**) disoluzioa euskarri batean hedatzen da eta, ondoren, polimeroa disolbaezina den likido-bainu batean murgiltzen da.

Metodo hau da erabiliena industria mailan mintz polimerikoak eratzeko, duen erraztasuna eta eskala handitzeko gaitasuna direla eta [28]. Tenperatura-inbertsioaren kasuan, bide hotza eta bide beroa daude (**8B. irudia**): hotzaren kasuan disoluzioaren tenperatura jaitsiz eragiten da polimeroaren hauspeatzea. Ez da ohiko metodoa, mintzaren oso propietate gutxi kontrola daitezkeelako. Erabiliagoa den bide beroaren kasuan, disolbatzaile-nahaste bat erabili ohi da polimeroa disolbatzeko, non polimeroa disolbaezina de-
nean lurrunkortasun baxuena duen. Modu honetan beroak disolbatzailea lu-
rruntzen du eta mintzaren eraketa bultzatzen da [29]. Disolbatzaile-inber-
tsioak zein beroaren bidezko tenperatura-inbertsioak antzeko abantailak eta
desabantailak dituzte: poroen propietateen kontrol hobea beste metodoek
baino, eskala handitzeko gaitasuna, *filler*-ak barneratzeko erraztasuna eta
lodieraren kontrola; baina, bestalde, birziklatzen zailak diren disolbatzaile
organikoen kantitate handiak erabiltzen dituzte.

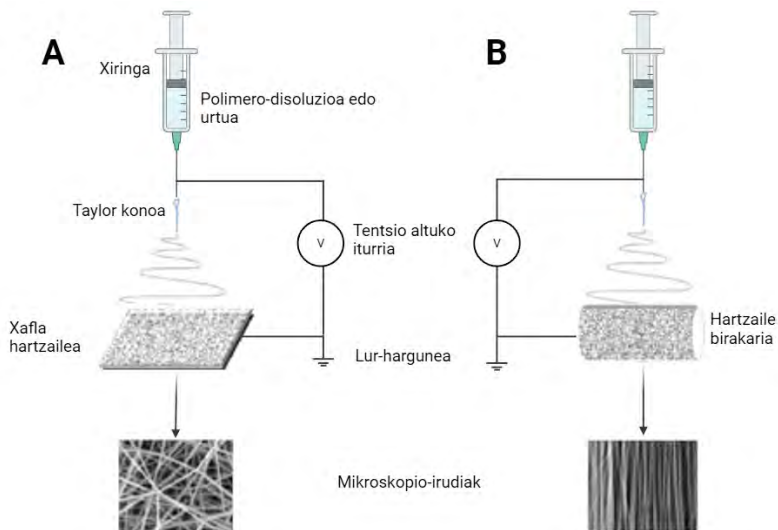


8. irudia. (A) Disolbatzaile-inbertsioaren prozesatzea erakusten duen irudi eskematikoa, non polimero-disoluzioa koagulazio-bainu batean murgiltzen den. (B) Tenperatura-inbertsioaren eskema sinplea, bide hotza eta beroa erakusten dituen.

3.2.4. Elektrosinning teknika

Mintzean zehar dauden elkarrekintzen efektua optimizatzen duen faktorea azalera da: hura handituz, kontaktu gunek —beraz, konposatuak kentzeko gaitasuna— handitzen dira. Azalera handitzeko metodoetatik onena egitura nanoskopikoak dira: nanopartikulak edo nanozuntzak, esaterako [30]; fenomeno honen aurrean garatu da elektrosinning teknika. Teknika honetan polimero diluitu edo urtua sartzen da xiringa batean eta tentsio

elektriko bat ezartzen zaio, ponpa baten bidez fluxu bat sortzen den bitartean [31]. Tentsio elektrikoak kargak sortzen ditu disoluzioan zehar, eta beren arteko aldarapenak aurrean jartzen den hartzaile eroale batera bultzatzen ditu. Luzapen-indarraren kontra disoluzioaren biskositatea dago, hau da, disoluzioa deformatzeko zailtasuna, eta nanozuntzen eraketa zailtzen duen bitartean, behin hauek sortu direlarik, haiek sortzen jarraitzea errazten du. Potentzial elektrikoak eta biskositatea orekatzen direnean, polimeroa hartzaile metalikora luzatzen da Taylor kono deiturikoa sortuz. Bidean lurrundu egiten da disolbatzailea eta modu berean polimeroa solidifikatzen da eta nanozuntzak eratzen ditu [32]. **9. irudian**, teknika honen ohiko bi eraketak irudikatu dira, non hartzaile ezberdinak ikusten diren. Hartzaile lauak (**9A. irudia**) ez du ezaugarri berezirik; zuntzak zorizko norabideetan biltzen ditu eta, distantziaren arabera, azalera handiagoa hartzen dute. Hartzaile birakariaren kasuan (**9B. irudia**), bira-abiadura bat ezarri behar da. Modu horretan zuntzek birarekin paraleloak diren norabideak hartzen dituzte, eta mintzari norabideaz bestelakoak izan daitezkeen propietateak (anisotropikoak) ematen zaizkio. Metodo honen bitartez adsortzio-gaitasun altuko mintzak sortzen dira eta kontrolatu egin daiteke haien lodiera; aldi berean, mintzean geratzen den disolbatzaile-kopurua txikia da beste metodoekin konparatuz. Alde negatibo gisa aipa daiteke metodo honek ez duela polimero guztietarako balio; gainera, optimizazio-prozesu sakona behar du polimero edo polimero-sistema bakoitzerako eta *filler*-ak erabiltzean parametro optimoak alda daitezke, denbora eskaera handia sortzen duen ezaugarria.



9. irudia. Elektrosprinkatzeko eraketaren adibideak: (A) hartzaile lau erabilia auzazko zuntzak lortzeko, eta (B) hartzaile birakaria erabilia zuntzen norabidea baldintzatzeko.

4. ONDORIOAK

Lan honetan erakusten den moduan, ezberdintasun handiak daude material batzuek eta besteek erakusten dituzten prozesatze-aukeretan. Materialen bitartez lortzen diren produktuen modura, prozesatze bakoitzak bere abantailak eta desabantailak ditu eta eman ahal zaizkien erabilerak ez dira guztiz berdinak, morfologia aldetik antzekoak izan badaitezke ere. Gaur egungo erronkak prozesatzearen hobekuntzan daude, aukera ematen baitute, uren garbiketa gauzatzearekin batera, prozesu industrialen jasangarritasuna eta etekina handitzeko eta, ondorioz, denon bizitza-kalitatea hobetzeko. Aldi berean, prozesu hauetan sortzen diren hondakinen kudeaketan eta mintzen berrerabilpenean zenbait arazo aurkitzen dira: denborarekin degradatzen dira eta uren kutsadura sortzeko arriskua izan dezakete. Horiek horrela, aurrera eramaten da material ezberdinen nahasketatik sortutako mintzak eta gaitasun bereziak dituzten materialen gaineko ikerkuntza: polimero-zeramika mintz hibridoak, kutsatzaileen degradazio arina bultzatzen dituzten konposatuak, degradazioan produktu geldoak edo onuragarriak sortzen dituzten materialak... guztia betiere ahal den kimiko toxikoen kopuru baxuena erabiliz

Garapena aurrera joan ahala eta prozeduren zein materialen ezaugarriak zehaztasun handiagoaz ezagutzen direlarik, errazagoa eta merkeagoa bilakatzen ari da haien konbinazioei etekina ateratzea, bata bestearen ahultasunak deuseztatuz eta arazoen aurrean konponbide hobeak emanez. Aldi berean, erabilera berriak aurkitzeko aukerak agertzen dira eta lana aurreratzen da beste mota batzuetako eremuetan; esaterako, medikuntzarako zauri-estalketak sortzen dira edo energiaren industrian baliabide berriak sortzen dira hura gordetzeko. Gai hauetan islatzen da ikerkuntzaren garrantzia: ulerkuntza garatuz eta ahal den eremu guztietara eramanez, mundua hobetzeko bidea aurkitzen da.

ESKER ONAK

Egileek eskerrak eman nahi dizkiote Euskal Autonomia Erkidegoko Gobernuari laguntza finantzarioagatik (Ikerketa Taldeak, IT1756-22), Elkartek Programa SMYRNA proiektuaren bidez (MX-2023/00028).

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] SONUNE, A.; GHATE, R. 2004. «Developments in wastewater treatment methods». DESALINATION A. SONUNE, R. GHATE / Desalination, 167, 55-63.
- [2] HIDALGO, A. M.; MURCIA, M. D. 2021. «Membranes for water and wastewater treatment». *Membranes*, **11**, DOI: 10.3390/membranes11040295.

- [3] GHANGREKAR, M. M.; CHATTERJEE, P. Carbon Nanostructures. Springer International Publishing 2018, . 11–26.
- [4] LALIA, B. S.; KOCHKODAN, V.; HASHAIKEH, R.; HILAL, N. 2013. «A review on membrane fabrication: Structure, properties and performance relations-hip». *Desalination*, **326**, 77-95.
- [5] KRÁLIK, M. 2014. «Adsorption, chemisorption, and catalysis». *Chemical Papers*, **68**, 1625-1638.
- [6] COVALIU-MIERLĂ, C. I.; MATEI, E.; STOIAN, O.; COVALIU, L.; CONSTANDACHE, A. C.; IOVU, H.; PARASCHIV, G. 2022. «TiO₂-Based Nanofibrous Membranes for Environmental Protection». *Membranes*, **12**, DOI: 10.3390/membranes12020236.
- [7] ISSAOUI, M.; LIMOUSY, L. 2019. «Low-cost ceramic membranes: Synthesis, classifications, and applications». *Comptes Rendus Chimie*, **22**, 175-187.
- [8] RASHID, M. H. O.; RALPH, S. F. 2017. «Carbon nanotube membranes: Synthesis, properties, and future filtration applications». *Nanomaterials*, **7**, DOI: 10.3390/nano7050099.
- [9] MADAENI, S. S.; GHAEMI, N.; RAJABI, H. Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Processes and Applications. Elsevier Inc. 2015, 3-41.
- [10] AMIN, S. K.; MOHAMED, H.; ROUSHDY, M. H.; ALY EL-SHERBINY, C. 2016. «An Overview of Production and Development of Ceramic An Overview of Production and Development of Ceramic Membranes». *International Journal of Applied Engineering Research*, **11**, 7708-7721.
- [11] HAKAMI, M. W.; ALKHUHIRI, A.; AL-BATTY, S.; ZACHAROF, M. P.; MADDY, J.; HILAL, N. 2020. «Ceramic microfiltration membranes in wastewater treatment: Filtration behavior, fouling and prevention». *Membranes*, **10**, 1-34.
- [12] M. KHAYET; T. MATSUMURA. 2011. *Membrane Distillation*. Elsevier.
- [13] ALKHUHIRI, A.; DARWISH, N.; HILAL, N. 2012. «Membrane distillation: A comprehensive review». *Desalination*, **287**, 2-18.
- [14] KAHRIZI, M.; GONZALES, R. R.; KONG, L.; MATSUYAMA, H.; LU, P.; LIN, J.; ZHAO, S. 2022. «Significant roles of substrate properties in forward osmosis membrane performance: A review». *Desalination*, **528**, DOI: 10.1016/j.desal.2022.115615.
- [15] LUO, Y.; ROUX, B. 2010. «Simulation of osmotic pressure in concentrated aqueous salt solutions». *Journal of Physical Chemistry Letters*, **1**, 183–189.
- [16] JOO, S. H.; TANSEL, B. 2015. «Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review». *Journal of Environmental Management*, **150**, 322-335.
- [17] RATHI, B. S.; KUMAR, P. S. 2021. «Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater». *Environmental Pollution*, **280**, DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116995.
- [18] WHITTEN, J. L.; YANG, H. n.d. *Theory of Chemisorption and Reactions on Metal Surfaces*.

- [19] HUBADILLAH, S. K.; OTHMAN, M. H. D.; MATSUURA, T.; ISMAIL, A. F.; RAHMAN, M. A.; HARUN, Z.; JAAFAR, J.; NOMURA, M. 2018. «Fabrications and applications of low cost ceramic membrane from kaolin: A comprehensive review». *Ceramics International*, **44**, 4538-4560.
- [20] MARINOIU, A.; IORDACHE, M.; TILIAKOS, A. 2022. «Solid-state synthesis of optimized NASICON $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ ceramic membranes». *Revue Roumaine de Chimie*, **67**, 63-70.
- [21] AGOUDJIL, N.; KERMADI, S.; LARBOT, A. 2008. «Synthesis of inorganic membrane by sol-gel process». *Desalination*, **223**, 417-424.
- [22] KHATIB, S. J.; OYAMA, S. T. 2013. «Silica membranes for hydrogen separation prepared by chemical vapor deposition (CVD)». *Separation and Purification Technology*, **111**, 20-42.
- [23] KOMALADEWI, A. A. I. A. S.; ARYANTI, P. T. P.; LUGITO, G.; WAYAN SURATA, I.; GEDE WENTEN, I.E3S Web of Conferences. EDP Sciences 2018.
- [24] LI, K.; ZHANG, Y.; XU, L.; ZENG, F.; HOU, D.; WANG, J. 2018. «Optimizing stretching conditions in fabrication of PTFE hollow fiber membrane for performance improvement in membrane distillation». *Journal of Membrane Science*, **550**, 126-135.
- [25] ZHANG, F.; FAN, J. BING; WANG, S. 2020. «Interfacial Polymerization: From Chemistry to Functional Materials». *Angewandte Chemie - International Edition*, **59**, 21840-21856.
- [26] RAAIJMAKERS, M. J. T.; BENES, N. E. 2016. «Current trends in interfacial polymerization chemistry». *Progress in Polymer Science*, **63**, 86-142.
- [27] KANG, M.; MYUNG, S. J.; JIN, H. J. 2006. «Nylon 610 and carbon nanotube composite by in situ interfacial polymerization». *Polymer*, **47**, 3961-3966.
- [28] ROZELLE, L.; CADOTTE, J.; CORNELIUSSEN, R.; ERICKSON, E.; COBIAN, K.; KO JR, C. V. 2000. «phase inversion membranes». *Encyclopedia of Separation Science; Mulder, M., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA* 3331-3346.
- [29] HOLDA, A. K.; VANKELECOM, I. F. J. 2015. «Understanding and guiding the phase inversion process for synthesis of solvent resistant nanofiltration membranes». *Journal of Applied Polymer Science*, **132**, DOI: 10.1002/a.42130.
- [30] RAY, S. S.; CHEN, S. S.; NGUYEN, N. C.; NGUYEN, H. T. Nanoscale Materials in Water Purification. Elsevier 2019, 247-273.
- [31] MAHDI A. SHIRAZI, M.; BAZGIR, S.; MESHKANI, F. Advances in Membrane Technologies. IntechOpen 2020.
- [32] AHMED, F. E.; LALIA, B. S.; HASHAIKEH, R. 2015. «A review on electrospinning for membrane fabrication: Challenges and applications». *Desalination*, **356**, 15-30.