



13. GAIA

GAS-LIKIDO OREKA ETA ABSORTZIO-/DESORTZIO- ERAGIKETA

GAI HAU IKASTEAN GAITASUN HAUEK LORTU BEHARKO DITUZU:

1. Dorre beteko eragiketan masa-balantzeak egin.
2. Soluturik gabeko oinarrian kontzentrazioak kalkulatu.
3. Absortzioa/Desortzioa eragiketan emari minimoak kalkulatu.
4. Dorre beteko eragiketan NTU eta HTU kalkulatu.

Gas-likido faseen arteko masa-transferentzian oinarritutako bereizte-eragiketek erabilera zabala daukate industria kimikoan. Horrelakoak dira, besteak beste, absortzioa, desortzioa eta humidifikazioa. Absortzioa gas-korronteak garbitzeko erabiltzen da maiz, eta, amoniakoa ekoizteko prozesuan, CO₂-a ezabatzeke metodoa da. Bero-trukagailuetan erabilitako ur epela hozteko, aire lehorrekin kontaktuan jartzen da. Gero, gas-likido oreka azalduko da eta, bukatzeko, absortzio- edo desortzio-eragiketak azalduko dira.

13.1 LIKIDO-GAS OREKA

Gas-faseko nahaste bat likido-fase batekin kontaktuan jartzean osagaien bat bi faseetan disolbagarria bada, osagai hori bi faseetan banatuko da. Oreka lortzen denean, sistema ideala bada, Raoult-en legearen arabera banatuko dira osagaiak bi faseetan (gas-fasean, osagai baten presio partziala likido-faseko mol-frakzioarekiko proportzionala da).

$$P_A = P_A^0 \cdot x_A \quad (13.1)$$

Raoult-en ekuazioak aplikazio zabala dauka nahaste idealen destilazioan. Beste sistema batzuetan, ordea —absortzioaren kasuan, adibidez—, gas-faseko solutua oso diluitua dago, eta idealtasunarekiko desbideraketak agertzen dira. Horrelako sistema askotan, solutuaren likido-faseko mol-frakzioa eta gas-faseko presio partziala Henry-ren legeak erlazionatzen ditu:

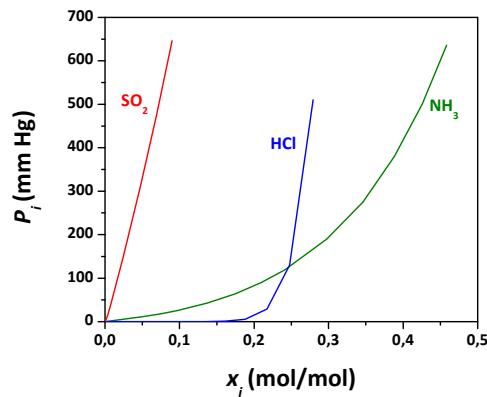
$$P_A = H_A \cdot x_A \quad (13.2)$$

H_A Henry-ren konstantea izanik.

Sistema askok ez du Henry-ren legeak aurreikusten duen linealtasuna, hots, oreka-erlazio ez-linealak dituzte. Horregatik, sistema askotan oreka-datuak esperimentalki neurtu behar dira. 13.1 taulan eta 13.1 irudian agertzen dira uretan disolbatutako gas batzuen oreka-datuak.

13.1 Taula. Hainbat soluturen Henry-ren konstantea (0°C).

Gasa	H_A (atm/mol)	Iruzkina
NH ₃	2,0	Uretan disolbagarria
C ₂ H ₆	268	Tarteko disolbagarritasuna
O ₂	2,5·10 ⁴	Uretan disolbaezina
CO	3,5·10 ⁴	Uretan disolbaezina



13.1 irudia. NH₃ (lerro berdea), SO₂ (lerro gorria) eta HCl-aren (lerro urdina) disolbagarritasuna uretan 0 °C-an.

Likido baten muinean gas batek duen disolbagarritasuna hainbat aldagaien arabera da. Eragin gehien daukaten aldagaiak, besteak beste, nahastaren konposizioa, sistemaren tenperatura, presio totala eta likido-faseko kontzentrazioa dira. Esperimentalki ikusienez, sistema gehienetan disolbagarritasuna honela aldatzen da:

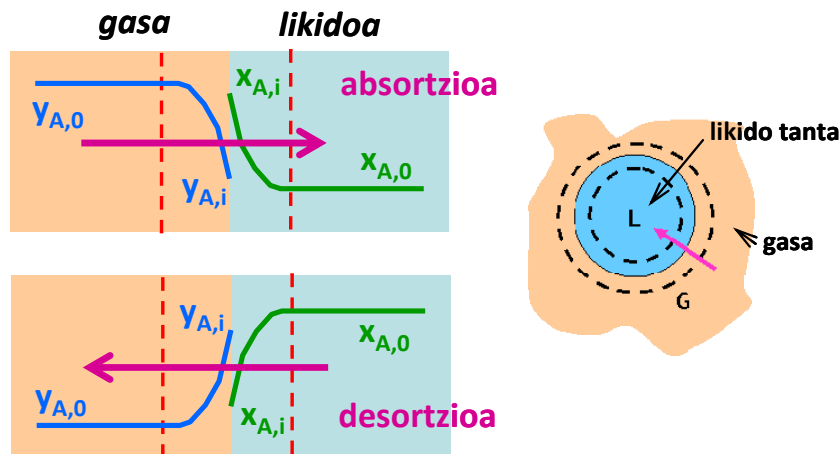
- Tenperatura handitzean, likidoan disolbagarritasuna txikitu egiten da, eta absortzioa ez dago faboratua; bai, ordea, desortzioa.
- Solutuaren presio partziala handitzean, likidoan disolbagarritasuna handitu egiten da; absortzioa faboratzen duen heinean, desortzioa ez du faboratzen.
- Presio totalaren eragina $P > 5$ atm denean igartzen da. Zenbat eta presio handiagoa, orduan eta faboratuagoa dago absortzioa.

13.2 ABSORTZIOA ETA DESORTZIOA

Gas-fasean dagoen solutu bat (edo gehiago) likido ez-lurrunkor batekin kontaktuan jartzean, likido-fasera transferitu daiteke (likidoan disolbagarria bada). Eragiketa horri **absortzio** deritza, eta gas-faseko nahasteak bereizteko erabiltzen da. Horretarako erabiltzen den likidoari disolbatzaile deritza, eta fase batetik bestera transferitzen den osagaia solutua da. Absortzio-eragiketaren aplikazioen artean, gas-fasetik kutsatzaileak ezabatzea edo gas-faseko osagai baliozkoak berreskuratzea daude.

Alderantzizko prozesuari **desortzio** (ingelesez, *stripping*) deritza. Hartan, likido-egoerako nahastea gas batekin ukipenean jartzean, likidoan dagoen osagai bat (edo gehiago) gasera transferitzen da. Erabileren artean, absortzioan erabilitako disolbatzailea berreskuratzeke erabiltzen da, batez ere.

Benetako sistemetan solutu bat baino gehiago egon arren, disolbatzailea selektiboa bada, jo daiteke fase batetik bestera solutua bakarrik garraiatzen dela. Aurrerantzean, solutu bakarreko (A deituko zaio) sistemak azalduko dira. Era berean, gas-faseko muina likidoan disolbaezina dela joko da (inertea edo geldoa) eta likido-faseko muina gasera ez dela pasatzen joko da. Mintz bikoitzaren teoriaren arabera, absortzio- eta desortzio-eragiketetan gertatzen den prozesu fisikoa 13.2 irudian agertzen da.



13.2 irudia. Absortzioaren eta desortzioaren ikuspegi fisikoa.

Bi eragiketak fase arteko masa-transferentziaz gertatzen dira. Likido- eta gas-faseetako mintzek eskaintzen dizkioten erresistentziak gaititu behar ditu solutuak, beste fasean disolbatu aurretik.

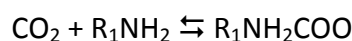
11. gaian ikusi da fase arteko masa-transferentziarako abiadura fasearteko azalerarekiko proportzionala dela (11.1 ekuazioa). Horregatik, eragiketa hauek egiteko orduan, ezinbestekoa da fasearteko azalera handitzea. Eragiketak ekipo berezietan egiten dira. Modu berean, masa-transferentziaren abiadura indar eragilearen arabera denez, orekatik ahalik eta alduen lan egiten da eragiketa hauetan.

Fase batetik besterako solutuaren transferentzia bigarren fasearekiko daukan afinitatearen arabera da. Afinitate hori disolbagarritasunaren arabera da, **absortzio fisikoa** denean. Erabiltzen den disolbatzaileak solutuarekin inolako erreakzio kimikorik ez duenean, absortzio fisikoa baino ez da gertatzen. Horrelakoak dira oxigeno-ur, nitrogeno-ur, bentzeno-olio astun sistemak.

Hala ere, horrelako sistema fisikoetan indar eragilea txikia izaten da, eta masa-transferentzia areagotzeko, **absortzio kimikoak** erabiltzen dira. Horretarako, bereziki aukeratutako disolbatzaileak erabiltzen dira, solutuarekin erreakzio kimikoak jasan eta afinitatea handitzeko. Horren ondorioz, indar eragilea handiagotu eta masa-transferentziarako abiadura areagotu egiten dira.

Absortzio kimikoko sistemak bi modutakoak izan daitezke, erreakzio kimikoaren itzulgarritasunaren arabera:

- Absortzio kimiko ez-itzulgarria, solutuak eta disolbatzaileak jasaten duten erreakzioa itzulezina bada. Ekoizpen txikiko instalazioetan erabiltzen da. Horrelako sisteman ezinezkoa da disolbatzailea berreskuratzea. Horrelakoa da CO_2 -NaOH sistema urtsua. Gaseko CO_2 -a sosaren disoluzio urtsuan disolbatzen da, eta CO_2 eta OH^- artean erreakzio ez-itzulgarria gertatzen da.
- Absortzio kimiko itzulgarria, solutuak eta disolbatzaileak jasaten duten erreakzioa itzulgarria denean. Disolbatzailea berreskuratzea edo berriro erabil daiteke. Horrelako disolbatzaileak ekoizpen-maila handiko instalazioetan erabiltzen dira, dirua aurreztu baitaiteke haiekin. Horrelako sistemak H_2S -DEA (dietilamina) edo CO_2 -MEA (metiletilamina) dira.



Absortzio kimikoaren adibide asko daude industrian. Adibidez, azido nitrikoaren eta azido sulfurikoaren ekoizpen-prozesuen azken etapak dira. Azido nitrikoaren prozesuan, NO_2 gasa urarekin absorbatzen da $\text{—NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{NO}$ erreakzioa emanez— eta, azido sulfurikoaren kasuan, SO_3 -a uretan absorbatzen da $\text{—SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$ erreakzioa emanez—.

Disolbatzailea berreskuratu eta berriro erabiltzeak dirua aurrezteak dakar kasu gehienetan. Disolbatzailea hainbat modutan berreskura daitekeen arren, desortzioa eta destilazioa erabiltzen dira gehien.

Absortziorako disolbatzaile egokiena aukeratzea kritikoa da, eragiketa-kostuak minimoak izan daitezen. Disolbatzaile egokiena aukeratzeko orduan, hiru faktore aztertu behar dira:

- (a) Absortzio-ahalmena (solutuarekiko daukan afinitatea). Solutuarekin afinitate handia izan behar du eragiketa eraginkorra izateko.
- (b) Hautakortasun handia izan behar du, eta interes gabeko beste solutuekiko inerteza izan.
- (c) Erraz berreskuratzekoa izan behar du, eragiketa-kostuak gehiegi handi ez daitezen.

Faktore horietaz aparte, beste faktore batzuk ere aztertu behar dira, korrosibitatea (ekipoen isolamendua saihesteko), biskositatea (ponpaketa garestitu dezake), toxikotasuna eta lurrunkortasuna (gasera ahalik eta gutxien pasa dadin), besteak beste.

13.3 ABSORTZIO ETA DESORTZIORAKO EKIPOAK

Orain arte esandakoaren arabera, bi faseen arteko masa-transferentzia abiadura handiz gerta dadin, bi faseek kontaktu sakona izan behar dute denbora batez. Bai absortzioa eta bai desortzioa ekipo berdinetan gertatzen dira.

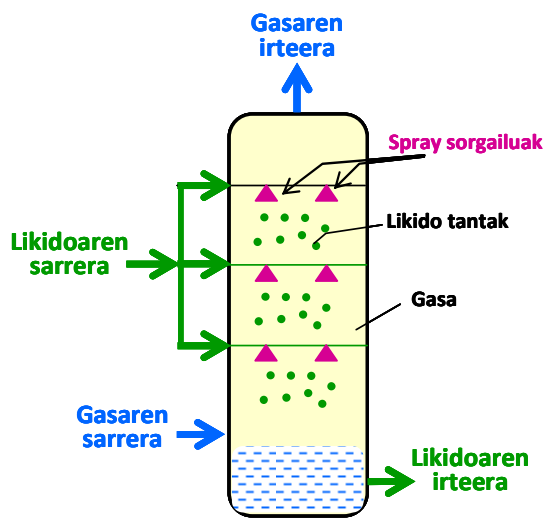
Industrian absortzioa edo desortzioa gertatzeko erabiltzen diren ekipoen artean, **dorre beteak** eta **dorre erretiludunak** erabiltzen dira gehien, eskala handiko eragiketetan batez ere. Hala ere, badaude beste ekipo batzuk, hainbat aplikaziotan erabilera dutenak. Adibidez, **esprai-dorreak** edo **tanga burbuilatuak** eskala txikiko aplikaziotan erabiltzen dira, bereizte-maila handia behar ez denean. 13.3 irudian eragiketa hauei dagozkien ekipoen eskemak azaltzen dira.

Dorre beteak zutikako dorreak dira, eta barrualdea fasearteko azalera handitzeko betegarritz beteta dago. Ekipo horietan, likidoak eta gasak kontrakorrantean zein paraleloan zirkula dezakete. Likidoak betegarria bustitzen du, eta gasaz inguratuta dago. Kontrakorrantean badihardute, likidoak goitik beherako bidea egiten du (grabitarearen eraginez) eta gasak behetik gorakoa; paraleloan zirkularaztean, normalean biek dorrearen behealdetik gorako noranzkoan zirkulatzen dute.

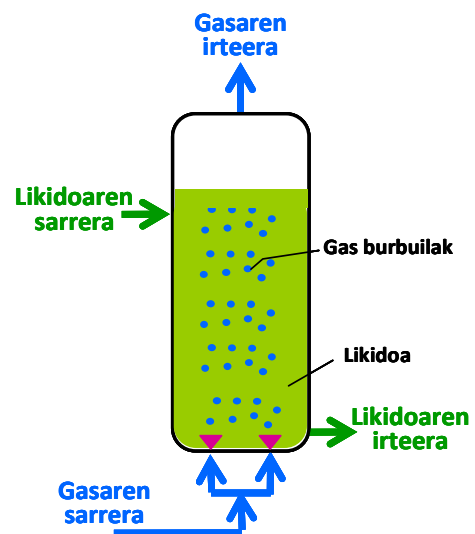
Dorre erretiludunak zutikako dorreak dira, eta zutabeko hainbat altueratan (sakabanatuta) erretiluak kokatzen dira. Erretilu bakoitzean likidoa dago (bere gaineko erretilutik datorren likidoa, eta bere azpiko erretilura erortzen dena), eta behetik gora doan gasa erretiluan dagoen likidoarekin kontaktuan dago; hala, masa-transferentzia gertatzen da. Erretilu idealean, likidoak eta gasak orekan irteten dira.

Ondoren, dorre beteen eta dorre erretiludunen diseinua azalduko da absortzio- zein esortzio-eragiketarako. Aurrerantzean eratorriko diren adierazpenak lortzeko, ondoren azaltzen diren suposizioak egingo dira:

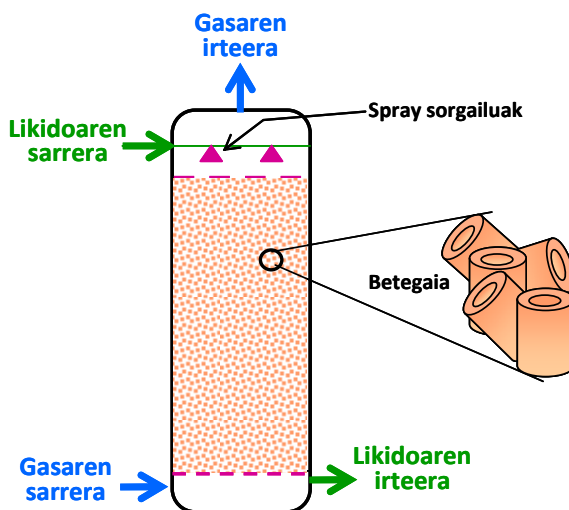
- Gas- eta likido-faseen muinean osagai bakarra disolbatuko da, eta solutu deituko zaio (A osagaia).
- Gas-faseko muina osatzen duen konposatua likidoan disolbaezina da, eta konposatu horri gas-faseko inerte deritzo. Era berean, likido-faseko muina osatzen duen konposatua gas-fasean disolbaezina da, eta konposatu horri likido-faseko inerte deritzo. Horregatik, gaseko eta likidoko inerteen emariak konstante irauten dute ekipo osoan.
- Temperatura eta presioa konstante mantentzen dira denboran eta ekipo osoan.
- Erretilutik irteten diren likido eta gasak orekan daude, hau da, etapa ideala gertatzen da.



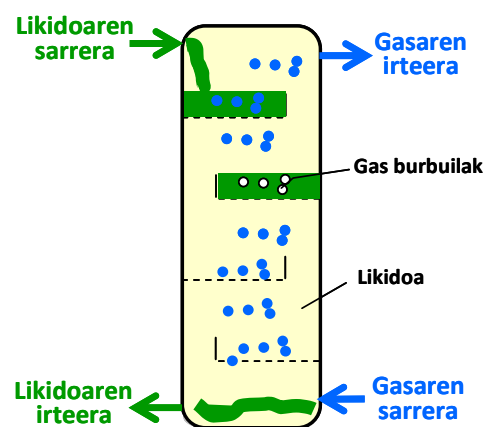
Espray dorrea



Dorre burbuilatua



Dorre betea



Dorre erretiluduna

13.3 irudia. G-L eragiketak (absortzioa eta desortzioa) gauzatzeko ekipo batzuk.

13.4 ABSORTZIO-ERAGIKETA DORRE BETEETAN

Dorre betean lan egitean bada, bi faseek paraleloan zein kontrakorrontean zirkulatu dezakete. Bi faseak paraleloan zirkularazten badira, kontaktuan jartzen diren unean bi faseen arteko solutuaren kontzentrazio-diferentzia handia denez, masa-transferentzia abiadura handiz gertatzen da, baina, dorrean aurrera egin ahala, indar eragilea murriztuz doa. Ekipoa oso luzea denean (infinitua), bi faseak orekan irteten dira.

Bi faseak kontrakorrontean zirkularazten badira, dorre osoan zehar indar eragilea mantentzen da, eta, hala, eragiketa eraginkorragoa da. Industriako eragiketa gehienak era horretan egiten dira.

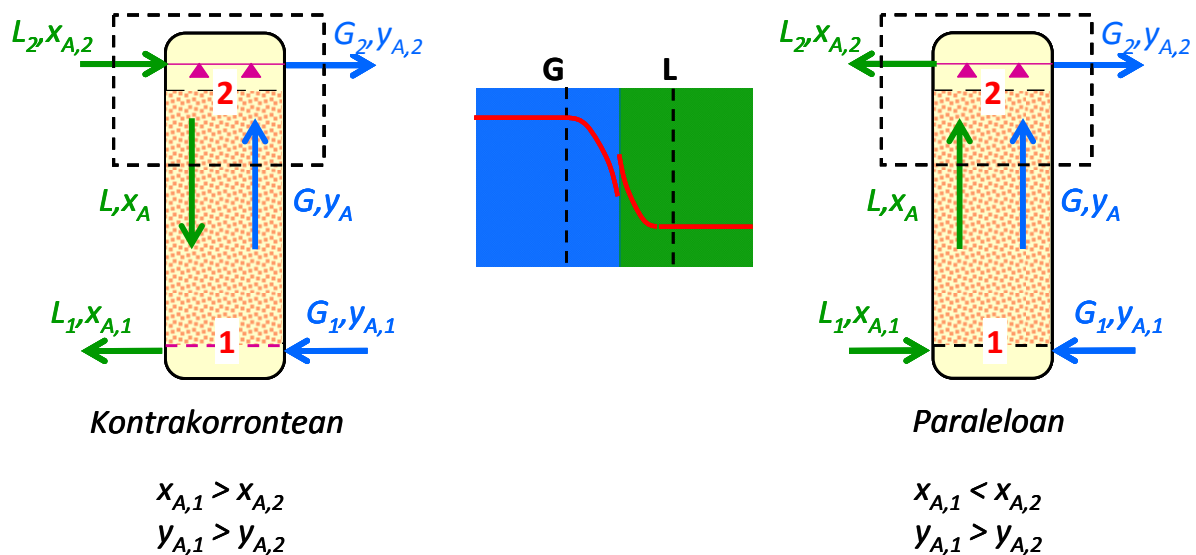
Dorre betean diseinua azaltzeko, absortzio-eragiketa hartuko da adibidetzat. Hala, tratatu beharreko gas-fasean A solutua kontzentrazio handian dago, eta haren kontzentrazioa gutxitzeko, likidoarekin kontaktuan jarriko da. Eragiketaren helburua $y_{A,1}$ kontzentrazioan dagoen solutua $y_{A,2}$ kontzentrazioa murriztea da.

$x_{A,1}$ eta $x_{A,2}$ likido-faseko solutuaren mol-frakzioak dira, dorre beteko 1 eta 2 puntuetan.

$y_{A,1}$ eta $y_{A,2}$ gas-faseko solutuaren mol-frakzioak dira, dorre beteko 1 eta 2 puntuetan.

G eta L gas- eta likido-faseen emari molarrak dira.

13.4 irudian lerro ez-jarraituz marraztutako sistema osoarentzat eta A solutuarentzat masa-balantzeak egiten dira, kontrakorrontean eta paraleloan zirkulatzen dutenerako, egoera geldikorrean:



13.4 irudia. Dorre beteko absortzioa kontrakorrontean eta paraleloan.

Masa-balantzeak, mol/denbora unitateetan:

Gaia	Kontrakorrontean	Paraleloan
Sistema osoa	$G + L_2 = G_2 + L$	$G + L = G_2 + L_2$
Solutua	$G \cdot y_A + L_2 \cdot x_{A,2} = G_2 \cdot y_{A,2} + L \cdot x_A$	$G \cdot y_A + L \cdot x_A = G_2 \cdot y_{A,2} + L_2 \cdot x_{A,2}$

Dorre beteko edozein puntutan gas-faseak duen mol-frakzioa askatzen bada:

Kontrakorrontean:

$$y_A = \left(\frac{L}{G}\right) \cdot x_A + \frac{G_2 \cdot y_{A,2} - L_2 \cdot x_{A,2}}{G} \quad (13.3)$$

Paraleloan:

$$y_A = -\left(\frac{L}{G}\right) \cdot x_A + \frac{G_2 \cdot y_{A,2} + L_2 \cdot x_{A,2}}{G} \quad (13.4)$$

Solutuaren masa-balantzeak diren 13.3 eta 13.4 ekuazioak y_A vs x_A grafikoan marraztu daitezke. Lerro horiek (L/G) eta ($-L/G$) maldakoak dira, kontrakorrantean eta paraleloan diharduten ekipoentzat, hurrenez hurren. Lerro horiei **eragiketa-lerro** deritze. Zutabe barruan A solutua gas-fasetik likido-fasera transferitzen da, eta likidoaren muinean disolbatzen da. Beraz, zutabearen, gas- eta likido-faseen emari totalak (G eta L) aldatuz doaz, L handitu eta G txikitu egiten baitira (desortzioan alderantzizkoa gertatzen da). Hori dela eta, 13.3 edo 13.4 ekuazioek ematen dituzten eragiketa-lerroak y_A vs x_A diagraman marrazten badira, ez dute malda konstantea, hau da, ez dira lerro zuzenak.

Lerro zuzenekin lan egitea lerro ez-zuzenekin lan egitea baino erosoagoa denez, arestian emandako eragiketa-lerroak moldatu egingo dira lerro zuzen bihurtzeko. Hori lortzeko, solutuaren kontzentrazioa soluturik gabeko oinarrian emango da.

Hala, aldagai hauek erabiliko dira:

G' (gas-faseko inerte-molak/denbora), L' (likido-faseko inerte-molak/denbora), X_A (likido-fasean solutuaren molak/likido-faseko inerte-molak) eta Y_A (gas-fasean solutuaren molak/gas-faseko inerte-molak) badira:

$$X_A = \frac{x_A}{1 - x_A} \quad (13.5)$$

$$Y_A = \frac{y_A}{1 - y_A} \quad (13.6)$$

Nahastean solutua oso diluitua dagoenean, $X_A \approx x_A$ eta $Y_A \approx y_A$ bihurtzen dira, baina, beste kasuetan, alde handia izan dezakete.

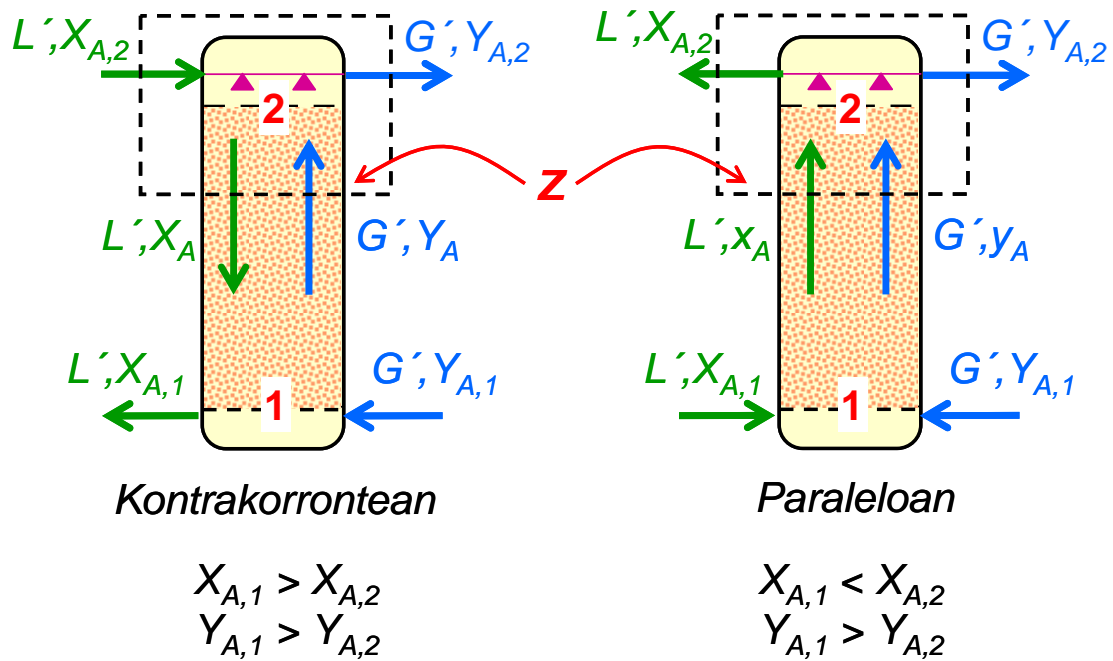
Soluturik gabeko oinarriko aldagai horiek hartzen badira, zutabeko puntu guztietan L' eta G' konstante mantentzen dira. Aldagai horiekin masa-balantzeak egiten badira, eragiketa-lerro hauek lortzen dira:

Paraleloan:

$$Y_A = \left(-\frac{L'}{G'}\right) \cdot X_A + \frac{G' \cdot Y_{A,2} + L' \cdot X_{A,2}}{G'} \quad (13.7)$$

Kontrakorrantean:

$$Y_A = \left(\frac{L'}{G'}\right) \cdot X_A + \frac{G' \cdot Y_{A,2} - L' \cdot X_{A,2}}{G'} \quad (13.8)$$

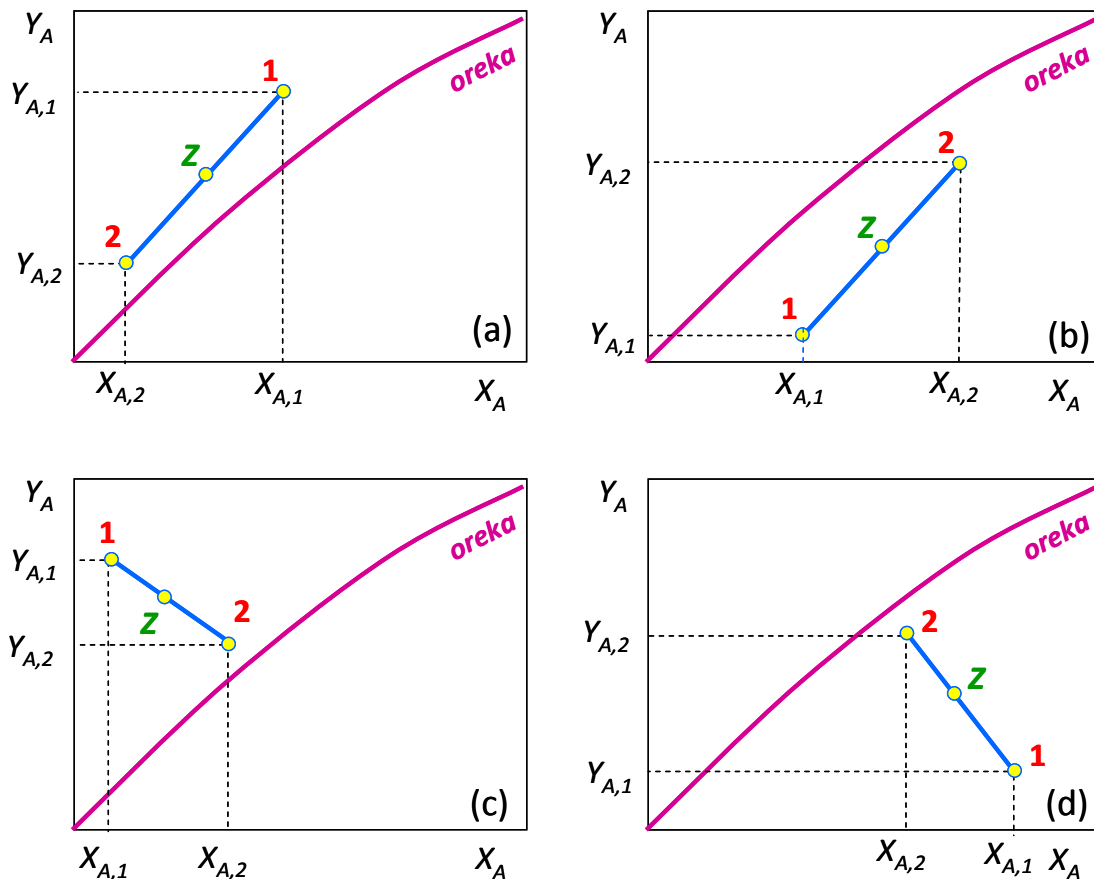


13.5 irudia. Dorre beteetako absortzioa kontrakorrontean eta paraleloan, soluturik gabeko oinarrian.

Solutuaren masa-balantzetik, likido-fasean disolbatu behar den solutu kantitatea kalkula daiteke, eta **garbitze-maila** deritzo:

$$G' \cdot (Y_{A,1} - Y_{A,2}) \tag{13.9}$$

Y_A vs X_A diagraman orekari dagokion lerroa marraztu da. Gas-likido oreka edozein modutakoa izan daitekeenez (Henry-ren legea bete dezake, edo erlazio ez-linealari jarrai diezaioke), 13.6 irudian oreka-erlazio generikoa agertzen da —orekako kontzentrazioak Y_A eta X_A moduan emanda daude—.



13.6 irudia. Eragiketa-lerroak eta oreka hainbat kasutarako: (a) absortzioa kontrakorrantean; (b) desortzioa kontrakorrantean; (c) absortzioa paraleloan; eta (d) desortzioa paraleloan.

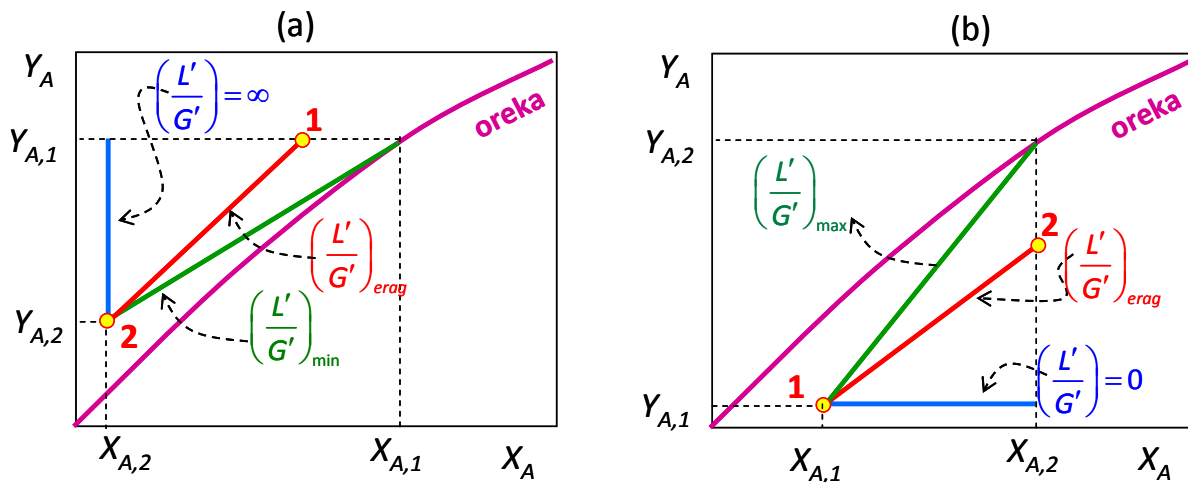
13.7 eta 13.8 ekuazioetan emandako eragiketa-lerroak lerro zuzenak dira Y_A vs X_A diagraman, eta zutabeko 1 eta 2 puntuak biltzen ditu (13.6 irudia). Lerro honetako Z puntuak adierazten du dorre beteko Z puntuan solutua nola banatzen den bi faseetan, hau da, likido- eta gas-faseetako kontzentrazioen berri ematen du. Irudiari erreparatuta, absortzioan, eragiketa-lerroaren puntu guztietan, gas-faseko A ren kontzentrazioa orekako kontzentrazioa baino handiagoa da (eragiketa-lerroa orekaren goialdean dago). Desortzioa gertatuko balitz, eragiketa-lerroak berdinak izango lirateke (13.7 eta 13.8 ekuazioak, paraleloan eta kontrakorrantean egiten direnerako, hurrenez hurren), baina bi lerroak orekaren azpialdean kokatuko lirateke.

Absortzio-eragiketean garbitu nahi den gas-emaria, gasaren konposizioa eta lanerako presioa finkatuta egon ohi dira. Dorre betearen barnean jariagaien presio-erorketa, garbitze-maila eta disolbatzailearen aukera zehaztuta egon daitezke, edo, beste kasu batzuetan, diseinatzailearen esku dago haiek ezartzea. Datu guztiak kontuan harturik, ingeniari kimikoak zutabe barruko betegarria, zutabearen diametroa, zutabearen altuera eta likido/gas erlazio ekonomikoarenari buruz erabaki behar du.

13.4.1 Disolbatzaile-emari minimoa absortzioa kontrakorrantean gertatzean

Kontrakorrantean lan eginez, absortzio-eragiketa batekin solutuaren kontzentrazioa $Y_{A,1}$ izatetik $Y_{A,2}$ izatera murriztu nahi da disolbatzaile likido egokia erabiliz (ikusi 13.7(a) irudia). Demagun erabiliko den disolbatzaile likidoan solutuaren kontzentrazioa $X_{A,2}$ dela (disolbatzaile purua bada zero izango litzateke, baina gerta daiteke disolbatzaileak solutu

apur bat edukitzea). Solutuari egindako masa-balantzearen arabera, gas-fasetik bereizi behar den solutu-emaria $G' \cdot (Y_{A,1} - Y_{A,2})$ da.



13.7 irudia. Eragiketa-lerroak disolbatzaile-emari infinituentzat, minimoarentzat eta eragiketa-errealarentzat (a) absortzioan; (b) desortzioan.

Garbitze-maila jakin bat lortzeko oso disolbatzaile-emari handia erabiltzen bada ($L \rightarrow \infty$), eragiketa-lerroaren malda infinitua da (13.7 irudian, lerro bertikala). Modu horretan lan eginez bereizte-maila maximoa lortzen den arren $[G' \cdot (Y_{A,1} - Y_{A,2})]$ eragiketa-kostuak handiegiak izango liratekeenez, horrela ez da lanik egiten.

Likido-emaria gutxitzen bada, eragiketa-lerroaren malda apaldu egiten da. Likidoaren emaria txikitzen jarraitzen bada, eragiketa-lerroak oreka ukituko luke, eta hori gertatzen denean malda minimoa da ($(L'/G')_{\min}$). Hori baino malda txikiagorik (likido-emari gutxiagorik) ezin da erabili, eragiketa-lerroak oreka-lerroa zeharkatuko bailuke. Likido-emari minimoarekin lan egitean, disolbatzailearen kostuak minimoak izango lirateke, baina zutabe azpiko inguruetan (1 puntua) masa-transferentziarako indar eragilea (eragiketa-lerroa eta oreka-lerroaren arteko distantzia) oso txikia denez, zutabeak altuera handiegia behar du, eta, horrenbestez, kostu finkoak izugarri handitzen dira. Hori saihesteko, likido-emari minimoa baino gehiago erabiltzen da, $(L'/G')_{\text{erag}}$ alegia. Printzipio heuristikoetan oinarrituz, absortzio prozesuetarako $\left(\frac{L'}{G'}\right)_{\text{erag}} \approx 1,4 \cdot \left(\frac{L'}{G'}\right)_{\min}$ erabili ohi da.

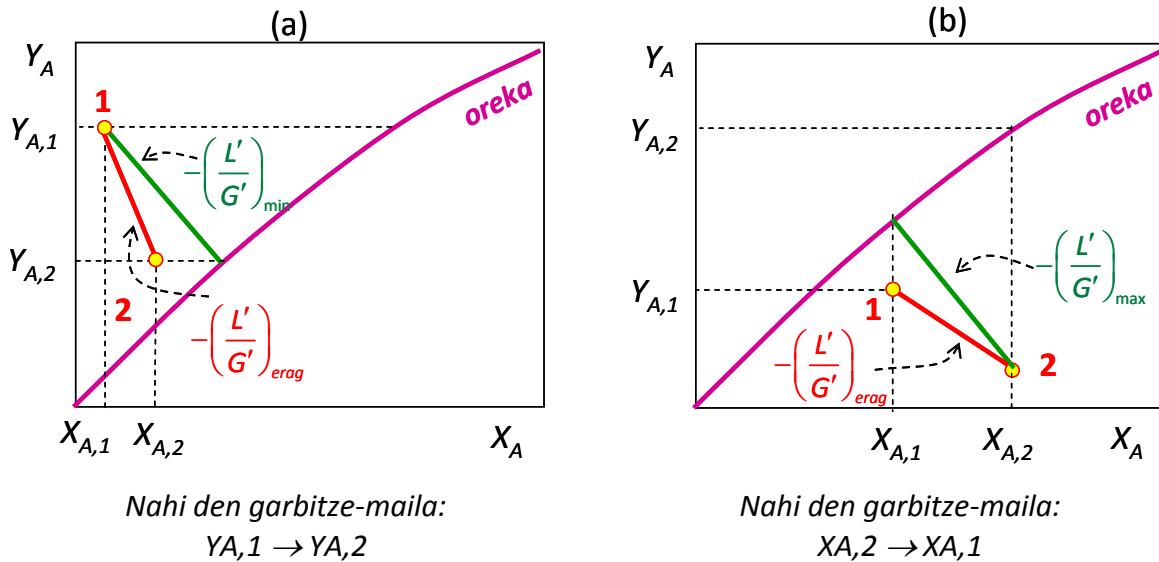
13.4.2 Gas-emari minimoa desortzioa kontrakorrantean egitean

Era berean, desortzio-eragiketa kontrakorrantean egiten bada, erabil daitekeen gas-emari infinitua eta minimoa daude (ikusi 13.7(b) irudia). Muturreko bi balio horiekin lan egingo balitz, eragiketa-kostuak izugarri handiak izango lirateke lehen kasuan, eta dorre betearen altuera infinitua beharko litzateke bigarren kasuan (beraz, kostu finkoak infinituak izango lirateke). Horregatik, benetako eragiketan tarteko gas-emaria erabiltzen da, $(L'/G')_{\text{erag}}$ malda, alegia.

Printzipio heuristikoek diotenez, desortzio-prozesuetarako $\left(\frac{L'}{G'}\right)_{\text{erag}} \approx 0,7 \cdot \left(\frac{L'}{G'}\right)_{\max}$ erabili ohi da.

13.4.3 Disolbatzaile-/gas-emari minimoa absortzioa/desortzioa paraleloan egitean

Printzipioz, ez dago inolako muga termodinamikorik paraleloan lan egitean, gas edo likidoaren emariari dagokionez. Hala ere, oreka-kurbaren itxuraren arabera, absortzioa egitean, likido-emari minimoa egon daiteke nahi den bereizte-maila lortu ahal izateko. Era berean, desortziorako ere gas-emari minimoa egon daiteke bereizte-maila finkatua lortzeko. Balio horiek 13.8 irudian agertzen dira.



13.8 irudia. Eragiketa errealetarako eragiketa-lerroak eta mugakoak paraleloan lan egiten duen absortziorako (a) eta desortziorako (b).

Adibidea 13.1 adibidea

15 °C eta 1 atm-n, airean dagoen Cl₂ gasa uretan disolba daiteke. Marraztu dezagun oreka-erlazioa P_{Cl_2} vs x_{Cl_2} , y_{Cl_2} vs x_{Cl_2} eta Y_{Cl_2} vs X_{Cl_2} diagrametan, $0 \leq x_{Cl_2} \leq 10^{-3}$ tarterako.

Datuak: oreka-erlazioa $P_{Cl_2} \text{ (atm)} = 495 \cdot x_{Cl_2}$ da; P_{Cl_2} (atm) aireko kloroaren presio partziala da, eta x_{Cl_2} uretako kloroaren mol-frakzioa.

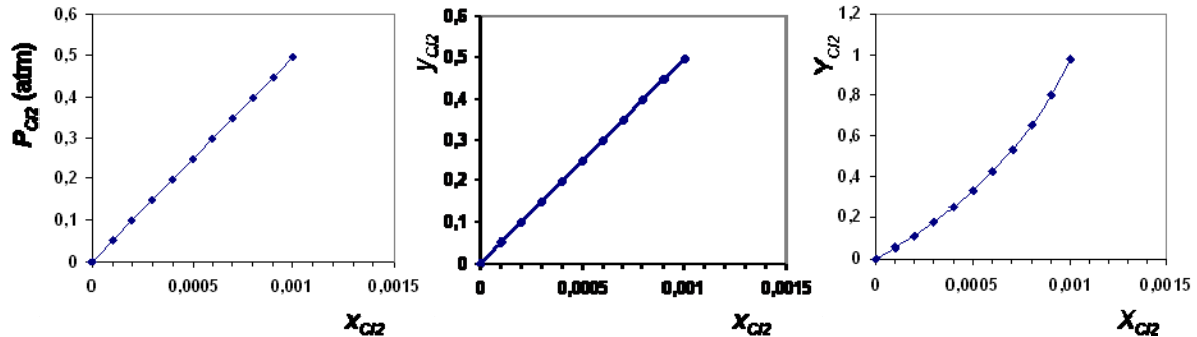
Ebazpena

Dalton-en legearen arabera, $y_{Cl_2} = \frac{P_{Cl_2}}{P}$ da. Soluturik gabeko oinarrian mol-frakzioak kalkulatzeko, 13.5 eta 13.6 ekuazioak erabiliko dira. Oreka-lerroaren muturra $X_{Cl_2} = 10^{-3}$ bada, $x_{Cl_2} \approx 10^{-3}$ da, eta, ondorioz, $P_{Cl_2} \leq 0,495$ eta $Y_{Cl_2} \leq 0,495$ dira. Ondoko taula eraiki da, x_{Cl_2} -ri balioak emanez; taulako beste zutabeetan, X_{Cl_2} , P_{Cl_2} , y_{Cl_2} , Y_{Cl_2} kalkulatu dira.

x_{Cl_2}	X_{Cl_2}	$P_{Cl_2} \text{ (atm)}$	y_{Cl_2}	Y_{Cl_2}
0	0	0	0	0
0,0001	0,00010	0,050	0,050	0,052
0,0002	0,00020	0,099	0,099	0,110
0,0003	0,00030	0,149	0,149	0,174
0,0004	0,00040	0,198	0,198	0,247
0,0005	0,00050	0,248	0,248	0,329
0,0006	0,00060	0,297	0,297	0,422

0,0007	0,00070	0,347	0,347	0,530
0,0008	0,00080	0,396	0,396	0,656
0,0009	0,00090	0,446	0,446	0,803
0,001	0,00100	0,495	0,495	0,980

Taulako datuak irudikatuta, oreka-diagrama hauek lortu dira:



Adibidea 13.2 adibidea

15 °C-an eta 1 atm-an Cl_2 -a daukan airea (molen % 50 Cl_2) garbitu nahi da; edukia % 20raino gutxitu nahi da. Horretarako, dorre bete batean, ur garbiarekin kontaktuan ipiniko da, kontrakorrantean. Kalkula ditzagun (a) zer ur-emari minimo erabil daitekeen, eta (b) minimoa baino % 50 ur gehiago sartzen bada, zutabetik irteten den likidoaren Cl_2 -edukia.

Ebazpena

Soluturik gabeko oinarriko oreka-datuak 13.1 adibidean lortu dira. A Cl_2 -ari deituz:

Kalkulurako oinarria: 100 kmol/h aire "zikin" ($G_1 = 100$ kmol/h) hartzen bada.

(1) Puntuan (behealdea): $G' = 50$ kmol/h aire, $Y_{A,1} = 1$ izanik.

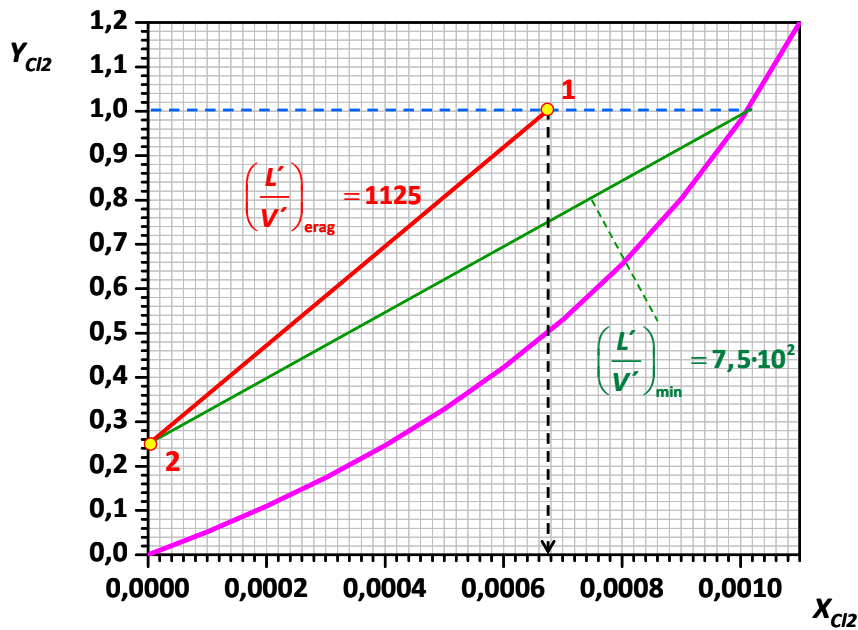
(2) Puntuan (goialdea): $G' = 50$ kmol/h aire, $Y_{A,2} = 0,2/0,8 = 0,25$ eta L' ezezaguna da, $X_{A,2} = 0$ da.

Y_A vs X_A grafikoan, oreka-lerroa marraztu da. Modu berean, zutabearen goialdeko 2 puntua marraztuko da (0, 0,25) puntua, alegia.

(a) Zer ur-emari minimo erabili behar den kalkulatzeko, 2 puntutik abiatzen den eta ($0,25 < Y_A < 1$) tartean oreka-kurbaren ukitzailea den lerro zuzena marraztuko da, eta haren malda kalkulatu da:

$$(L'/G')_{\min} = 7,5 \cdot 10^2. \text{ Beraz, } L'_{\min} = 3,75 \cdot 10^4 \text{ kmol/h da.}$$

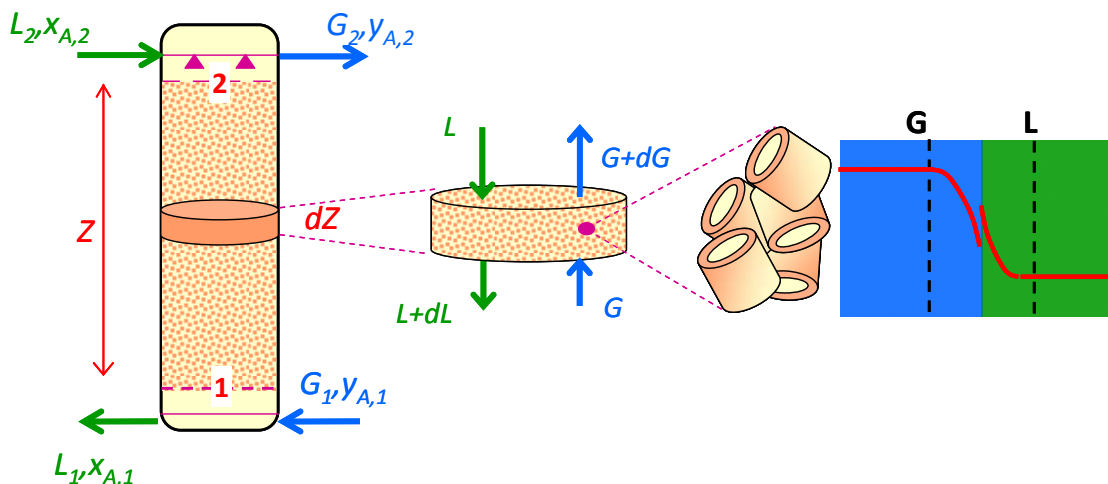
(b) Eragiketan erabiliko den $(L'/G')_{\text{erag}} = 1125$ da.



Zutabearen azpialdetik irteten den likidoaren kloro-edukia $X_A = 6,7 \cdot 10^{-4}$ dela ikusten da grafikoan; beraz, $x_A \approx 6,7 \cdot 10^{-4}$ da.

13.5 ABSORTZIO ETA DESORTZIORAKO DORRE BETEAN ALTUERAREN KALKULUA

Absortzio- edo desortzio-eragiketa dorre betean egiten denean, dorreak behar duen gutxieneko altueraren kalkulua azalduko da. Horretarako, kontrakorrontean diharduen absortzio-eragiketa aukeratuko da. 13.9 irudiko dorre betean dZ altuerako xafla hartu da; zati horretan, A osagaiaren kantitate txiki bat gasetik likidora pasatzen da, faseartean zehar. Egoera geldikorrean badihardu:



13.9 irudia. Dorre betean dZ altuerako xafla, eta hor gertatzen den masa-transferentzia.

Honela idatz daiteke dZ altuerako xaflan gertatzen den Aren masa-transferentziaren abiadura:

$$dN_A = k_y \cdot dA \cdot (y_A - y_{A,i}) = k_x \cdot dA \cdot (x_{A,i} - x_A) \tag{13.10}$$

$$dN_A = K_y \cdot dA \cdot (y_A - y_A^*) = K_x \cdot dA \cdot (x_A^* - x_A) \quad (13.11)$$

Xafla horretan fasearteko azalera $dA = a \cdot S \cdot dZ$ gisa adieraziko da, S dorrearen sekzioa izanik. a parametroa masa-transferentziarako azalera da (bolumen-unitateko betegarriak eskaintzen duen azalera).

$$dN_A = k_y \cdot a \cdot S \cdot dZ \cdot (y_A - y_{A,i}) = k_x \cdot a \cdot S \cdot dZ \cdot (x_{A,i} - x_A) \quad (13.12)$$

$$dN_A = K_y \cdot a \cdot S \cdot dZ \cdot (y_A - y_A^*) = K_x \cdot a \cdot S \cdot dZ \cdot (x_A^* - x_A) \quad (13.13)$$

Era berean, $dN_A = d(V \cdot y_A) = -d(L \cdot y_A)$ denez, gas-faserako deribatzen bada:

$$dN_A = d(G \cdot y_A) = d \left(G' \cdot \frac{y_A}{1 - y_A} \right) = G' \cdot \frac{dy_A}{(1 - y_A)^2} = G \cdot \frac{dy_A}{(1 - y_A)} \quad (13.14)$$

Beraz, $G \cdot \frac{dy_A}{(1 - y_A)} = k_y \cdot a \cdot S \cdot dZ \cdot (y_A - y_{A,i})$ ekuazioa zutabeko 1 eta 2 puntuen artean integratuz,

dorre beteak behar duen gutxieneko altuera kalkula daiteke. Horretarako, zutabe osoan $k_y \cdot a$ eta G -aren batez besteko balioak erabiliko dira.

$$\left(\frac{G}{k_y \cdot a \cdot S} \right) \int_{y_{A,1}}^{y_{A,2}} \frac{dy_A}{(1 - y_A) \cdot (y_A - y_{A,i})} = Z \quad (13.15)$$

$\left(\frac{G}{k_y \cdot a \cdot S} \right)$ terminoak luzera dimentsioa du, eta gas-fasean oinarritutako **transferentziarako**

unitatearen altuera gisa ezagutzen da (**HTU_g**, *Height of the Transfer Unit*). Haren balioa zutabean tratatzen den emariaren araberakoa eta betegarriak eskaintzen dituen propietateen araberakoa da. Esanahi fisiko hau du: tratatu behar den emariarekin eta dorrea eraikita dagoen betegarriarekin, masa-transferentzia gerta dadin unitateak izan behar duen altuera, hau da, betegarriaren eraginkortasuna.

$\int_{y_{A,1}}^{y_{A,2}} \frac{dy_A}{(1 - y_A) \cdot (y_A - y_{A,i})}$ terminoa dimentsiogabea da, eta gas-fasean oinarritutako

transferentziarako altuera unitatea (**NTU_g**, *Number of Transfer Unit*) deritzo. Eragiketaren zailtasunaren berri ematen du: zenbat eta zailagoa den bereiztea, orduan eta handiagoa izango da **NTU_g**.

Dorre betearen altuera, Z , honela kalkulatu da:

$$Z = HTU_g \cdot NTU_g \quad (13.16)$$

Gas-fasea oinarritzat erabili ordez, likido-fasea erabili izan balitz, honela kalkulatu litzateke dorrearen altuera:

$$\left(\frac{L}{k_x \cdot a \cdot S} \right) \int_{x_{A,1}}^{x_{A,2}} \frac{dy_A}{(1 - x_A) \cdot (x_{A,i} - x_A)} = Z \quad (13.17)$$

$\left(\frac{L}{k_x \cdot a \cdot S}\right) = HTU_l$: likido-fasean oinarritutako transferentziarako unitatearen altuera gisa ezagutzen da (HTU_l , Height of the Transfer Unit).

$\int_{x_{A,1}}^{x_{A,2}} \frac{dx_A}{(1-x_A)(x_{A,i} - x_A)} = NTU_l$: likido-fasean oinarritutako transferentziarako altuera unitatea (NTU_l , Number of Transfer Unit).

Dorre betearen altuera, Z, honela kalkulatu da:

$$Z = HTU_l \cdot NTU_l \quad (13.18)$$

Masa-transferentziarako koefiziente globalak erabiliko balira, prozedura hau erabiliko litzateke:

Oinarria	NTU	HTU	Z
Gas-fasea	$\left(\frac{G}{K_y \cdot a \cdot S}\right) = HTU_{O,g}$	$\int_{y_{A,1}}^{y_{A,2}} \frac{dy_A}{(1-y_A)(y_A - y_A^*)} = NTU_{O,g}$	$HTU_{O,g} \cdot NTU_{O,g}$
Likido-fasea	$\left(\frac{L}{K_x \cdot a \cdot S}\right) = HTU_{O,l}$	$\int_{x_{A,1}}^{x_{A,2}} \frac{dx_A}{(1-x_A)(x_A^* - x_A)} = NTU_{O,l}$	$HTU_{O,l} \cdot NTU_{O,l}$

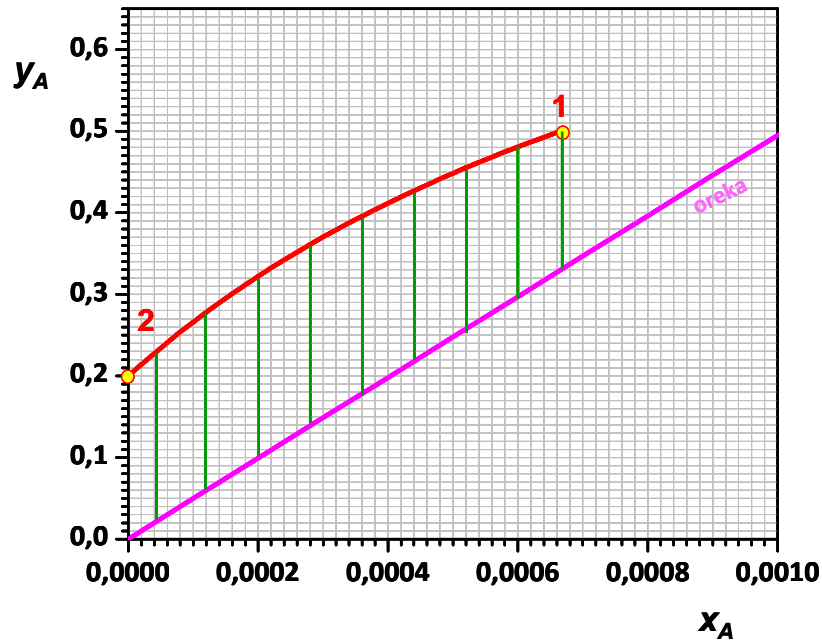
Adibidea 13.3 adibidea

13.2 adibideko eragiketa burutzeko, kalkula dezagun dorre beteak gutxienez zer altuera izan behar duen, 100 kmol/h aire "zikin" elikatzen badira.

Datuak: eragiketa-baldintzetan sistema honentzat $\overline{K}_y \cdot a = 50 \text{ kmol/hm}^3$ dela hartuko da. Dorre betearen sekzioa $S = 1 \text{ m}^2$ da.

Ebazpena

Sistema honentzat y_{Cl2} vs x_{Cl2} diagramarako oreka kalkulatu da. Kloroa solutua denez, A osagaia izango da aurrerantzean. $y_{A,1} = 0,5$ izatetik $y_{A,2} = 0,2$ izatera murriztu nahi da. Gas-faseko koefiziente globala erabiltzen bada, integrala ebazteko y_A^* balioak kalkulatu behar dira zutabeko hainbat puntutarako (10. gaian azaldu da nola kalkulatu den).



Dorre beteko 1 eta 2 puntuen arteko balio batzuekin taula hau bete da:

y_A	$1-y_A$	y_A^*	$(y_A - y_A^*)$	$\frac{1}{(1-y_A) \cdot (y_A - y_A^*)}$
0,500	0,500	0,34	0,160	12,500
0,481	0,519	0,3	0,181	10,659
0,455	0,545	0,26	0,195	9,405
0,427	0,573	0,22	0,207	8,431
0,396	0,604	0,18	0,216	7,669
0,361	0,639	0,14	0,221	7,080
0,322	0,678	0,1	0,222	6,643
0,278	0,722	0,06	0,218	6,354
0,200	0,800	0,02	0,180	6,944

Integralaren ebazpen grafikoa egiteko, taulako azken zutabea vs. lehen zutabea irudikatuko da. Azpiko azalera kalkulatu, $NTU_{0,g} = 2,31$ da.

$HTU_{0,g}$ kalkulatzeko:

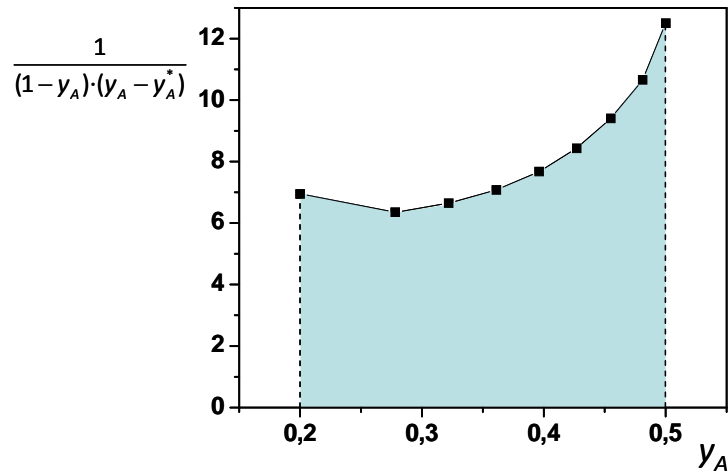
Zutabeko (2) puntuan $G_2 = 100$ kmol/h da.

Zutabeko (1) puntuan $G_1 = 62,5$ kmol/h (50 kmol/h aire garbi eta 12,5 kmol/h Cl_2)

Zutabe osorako batez besteko $G = 81,25$ kmol/h da.

$$HTU_{0,g} = \left(\frac{G}{K_y \cdot a \cdot S} \right) = \frac{81,25 \text{ kmol/h}}{50 \text{ kmol/hm}^3 \cdot 1 \text{ m}^2} = 1,625 \text{ m}$$

Dorre betearen altuera = 3,75 m da.



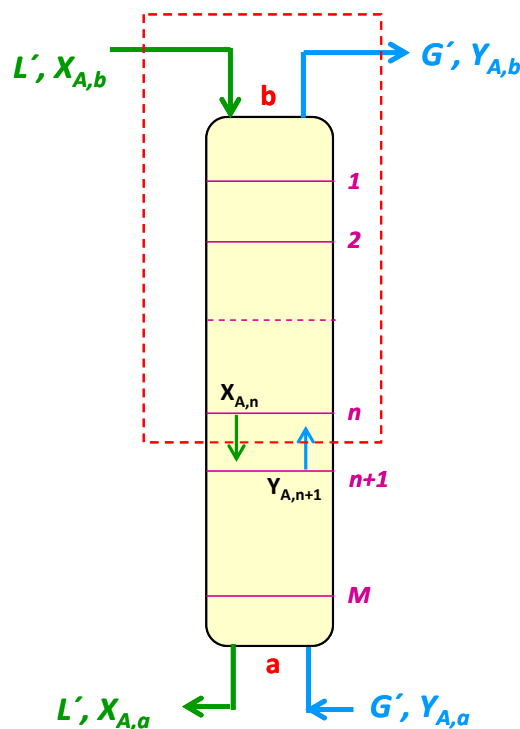
13.6 ABSORTZIOA ETA DESORTZIOA DORRE ERRETLUDUNETAN

Horrelako ekipoak destilaziorako erabilitakoen berdinak dira. Likidoak eta gasak kontrakorrontean zirkulatu behar dute, likidoa goitik behera eta gasa behetik gora.

Lehen aipatu den bezala, soluturik gabeko oinarrian emandako konposizioak erabiltzen badira, hau da kontrakorrontean egiten den absortzio baterako eragiketa-lerroa, zutabearen azpialdeari **a** eta zutabearen goialdeari **b** deituz:

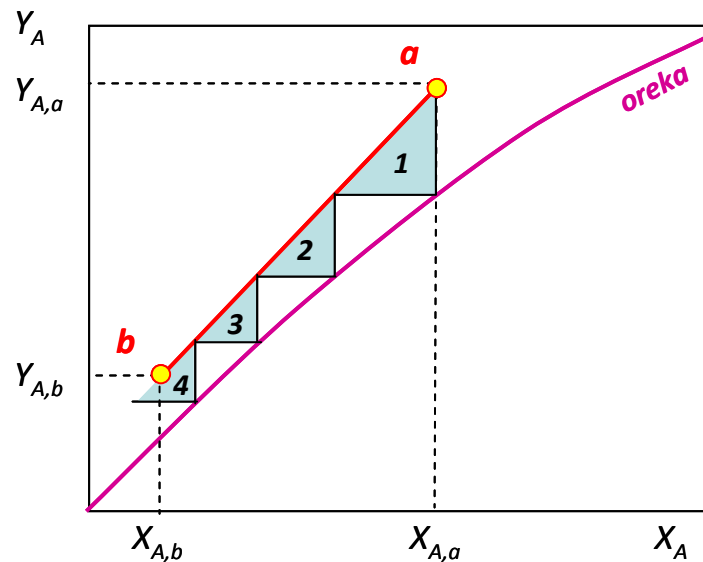
$$Y_A = \left(\frac{L'}{G'}\right) \cdot X_A + \frac{G' \cdot Y_{A,b} - L' \cdot X_{A,b}}{G'}$$

Lerro zuzen horrek zutabeko edozein puntuan gora doan gaseko eta behera doan likidoko solutuaren kontzentrazioak erlazionatzen ditu, 13.10 irudian agertzen den bezala.



13.10 irudia. Dorre erretiluduneko absortzio-eragiketa.

Eragiketa burutzeko zenbat etapa behar diren McCabe-Thiele-ren metodo grafikoaz kalkulatu da —destilazioan egiten den antzera—, erretilu bakoitzean gasa eta likidoa orekan irteten direla kontuan harturik. 13.11 irudian agertzen da ekipo erretiludun bateko absortzio-eragiketa egiteko behar den erretilu kantitatea kalkulatzeko ebazpen grafikoa. Marraztu den adibidean lau etapa teoriko behar direnez, lau erretiluz eraikitako dorrea erabili beharko litzateke, erretiluen eraginkortasuna % 100 dela hartzen bada.



13.11 irudia. Absortzioa gertatzeko behar den erretilu kantitatearen ebazpen grafikoa.

Adibidea 13.4 adibidea

15 °C-an eta 1 atm-an, Cl_2 -a daukan airea (molen % 50 Cl_2) garbitu nahi da; edukia % 20raino gutxitu nahi da. Horretarako, dorre erretiludunean, ur garbiarekin kontaktuan ipiniko da, kontrakorrantean. Kalkula ditzagun (a) minimoa baino % 10 ur gehiago sartzen bada, zutabetik irteten den likidoaren Cl_2 -edukia, (b) horretarako zenbat erretilu behar diren.

Ebazpena

Gas “zikinaren” 100 kmol/h-eko emaria hartzen bada, $G' = 50$ kmol/h eta $Y_{A,a} = 1$ lortzen da. Erabiltzen den likidoa garbia denez, $X_{A,b} = 0$ da. Irteerako gasean solutuaren kontzentrazioa $Y_{A,b} = 0,25$ izatea nahi da.

(a) (2) adibidean kalkulatu da $(L'/G')_{\min} = 750$ dela. Eragiketean erabili beharreko malda, berriz, 8.125 izanik, Y_A vs X_A diagraman marraztu da. Grafikoan begiraturaz, likidoan irteten den solutuaren kontzentrazioa $X_{A,a} = 0,00091$ da.

(b) Erretiluak zenbatzeko, eskailerak marraztuko dira, **a** puntutik hasita eta **b** punturaino. Irudiaren arabera 4 erretilu beharko lirateke eragiketa burutzeko.

