



# 12. GAIA

## LIKIDO-LURRUN OREKA ETA DESTILAZIOA

GAI HAU IKASTEAN GAITASUN HAUEK LORTU BEHARKO DITUZU:

1. Nahaste idealen lurrin-presioen, irakite-tenperaturen eta oreka-erlazioaren diagraman irudikatu eta kalkulatu.
2. Flash destilagailua analitikoki eta grafikoki diseinatu.
3. Flash destilagailuan energia balantzea egin.
4. Destilazio diferentziala diseinatu.
5. Errefluxu-destilazioan masa-balantzeak egin.
6. Errefluxu-destilazioa grafikoki ebatzi.
7. Ihintz- eta burbuila-tenperaturak kalkulatu.

Likido- zein gas-faseko nahaste homogeneousak bereizteko eragiketarik ezagunena destilazioa da. Gizakiak aspaldidanik erabili du, eta gaur egungo industria kimikoan berebiziko erabilera dauka. Adibidez, aireko nitrogenoa, oxigenoa eta argona bereiztea edo petrolioaren zatien bereizketa destilaziotik egiten da. Destilazioan, likidoa eta lurruna bi fase nahastezinen arteko masa-transferentzia gertatzen da faseartean.

## 12.1 LIKIDO-LURRUN OREKA

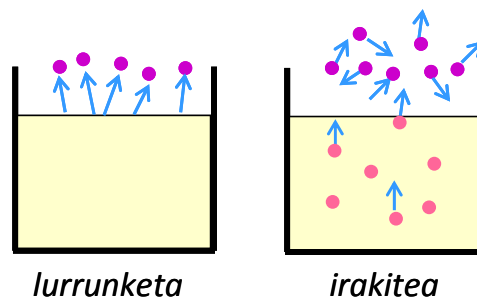
Presio finkatuan, konposatu kimiko puruaren likido- eta lurrun-faseak elkarrekin gertaitezkeen tenperatura bakarra dago, irakite-tenperatura, alegia. Likido-egoeran konposatu purua berotzean, lurrun-presioa handitu egiten da, haren gaineko gasaren presioa berdindu arte.

Lurrun-burbuilak sortzeko, likido-faseko molekulen arteko erakarpen-indarra gainditu beharra dago. Lurrundutako burbuilak likidoaren muinean sortzen dira eta likidoaren gainazalera igotzen dira, eta gasera pasatzen.

**Lurrunketa:** Likidoaren gainazaleko fenomeno da, eta edozein tenperaturatan gertatzen da. Likidoaren muinean ezin da gas-burbuilarik sortu, lurrun-presioa gainazaleko presioa baino baxuagoa delako.

**Irakitea:** Gainazaleko fenomeno izateaz gainera, muineko fenomeno ere bada. Likidoaren muinean gas-burbuilak sortzen dira, lurrun-presioa likidoaren gainazalekoa baino handiagoa izan baitaiteke.

Likido-faseko molekulak etengabeko mugimenduan daude, eta gainazalaren inguruko molekula batzuk molekulen arteko erakarpen-indarra gainditzeko adina energia badaukate, lurrun-fasera pasatzen dira; hala gertatzen da lurruntzea. Prozesua itzulezina da. Destilazio eragiketan irakite-fenomenoa gertatzen da.



12.1. irudia. Lurrunketa eta irakitea.

Likido puru baten irakite-tenperatura haren lurrun-presioa eta likidoaren gainazaleko presioa berdintzen dituen tenperatura da. Likido puruen kasuan, lurrun-presioaren eta tenperaturaren arteko erlazioak bibliografian agertzen dira. Ohiko substantzien lurrun-presioak tenperatura-tarte bateko balioetara interpolatzeko, Antoine-ren ekuazioa erabiltzen da:

$$\log P^0 = A - \frac{B}{T + C} \quad (12.1)$$

A, B eta C, substantzia bakoitzarentzako koefizienteak dira, eta bibliografian taulatuta agertzen dira.

Konposatu kimiko purua likido-egoeran egon daitekeen jakiteko, haren tenperatura kritikoa aztertu behar da: tenperatura kritikoa gainera, substantzia ezin da likido-egoeran egon. Tenperatura kritikoa azpitik dagoen gasari **lurrun** deritza, eta tenperatura kritikoa gainera dagoenari **gas** deritza. Hala, uraren tenperatura kritikoa 374 K izanik, 393 K-ra dagoen urari lurrun deritza; 293 K dagoen nitrogenoari, berriz, gas deritza, haren tenperatura kritikoa 126,2 K delako.

Nahaste bitarraren kasuan (A osagai lurrunkorrena eta B osagai astunena izanik), Gibbs-en faseen erregelaren arabera, bi aldagai zehaztu behar dira oreka definitzeko.  $P$  (presioa),  $T$  (tenperatura) eta osagai baten likido- eta lurrun-konposizioak ( $x_A$ ,  $y_A$ ) zehatz daitezke.

Osagai lurrunkorrena irakite-tenperatura baxuena duen konposatua (lurrun-presio altuena daukana) da; osagai astuna, berriz, irakite-tenperatura altuena duen konposatua. Astun hitzak ez du zerikusirik pisuarekin edo dentsitatearekin.

Lurrun-fasean bi konposatu baldin badaude, lurrun-faseko presio totala osagai bakoitzaren presio partzialen batura da:

$$P = P_A + P_B \quad (12.2)$$

Nahaste idealek betetzen dute Raoult-en legea. Bi osagaien egitura kimikoa antzekoa bada, molekulen arteko elkarrekintza antzekoa da, eta nahastean, likidoarekin orekan dagoen gasean, osagai bakoitzaren presio partziala osagai bakoitzaren lurrun-presioarekiko proportzionala da.

Raoult-en legearen arabera:

$$\left. \begin{aligned} P_A &= P_A^0 \cdot x_A \\ P_B &= P_B^0 \cdot x_B \end{aligned} \right\} \quad (12.3)$$

dira.

Beraz, disoluzioa ideala bada, likidoarekin orekan dagoen lurrunean presio hau dago (kontuan hartu nahastea bitarra bada  $x_A + x_B = 1$  dela):

$$P = P_A^0 \cdot x_A + P_B^0 \cdot (1 - x_A) \quad (12.4)$$

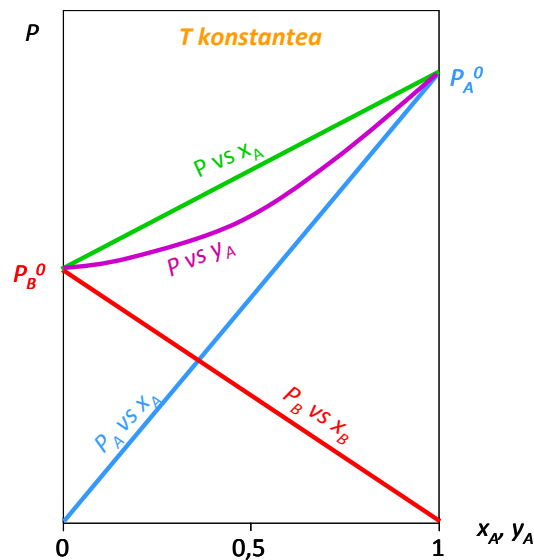
Horrelakoak dira tolueno-bentzeno eta oktano-heptano sistemak. Beste sistema askotan, ordea, idealtasunarekiko desbideratzeak nabari dira.

## 12.2 NAHASTE IDEALEN OREKA-ERLAZIOAK

### 12.2.1 Lurrun-presioen diagrama

Nahastea ideala bada, tenperatura konstantean, 12.2 irudikoa bezalako lurrun-presioen diagrama eraiki daiteke. Era berean, lurrun-fasean osagai lurrunkorrenaren mol-frakzioa  $y_A$  bada, Dalton-en erlazioa ere beteko da.

$$P = \frac{P_A}{y_A} = \frac{P_A^0 \cdot x_A}{y_A} \quad (12.5)$$



### 12.2 irudia. Nahaste ideal baten lurrun-presioen diagrama tenperatura konstantean.

Raoult-en legea betetzen duen nahaste bitar batean, A eta B osagaien lurrun-faseko presio partziala likido-fasean daukaten mol-frakzioarekiko proportzionala da, eta osagai bakoitzaren lurrun-presioa da proportzionaltasun-erlazioa. Lurrun-faseko presio osoa bi osagaien presio partzialen batura da ( $P$  vs  $x_A$ ). Tenperatura aldatzean, lurrun-presioak aldatzen direnez, irudiko lerroak ere aldatu egiten dira ( $P_A$  eta  $P_B$  lerroen malda handiagoa da, eta ordenatuen ardatzean gorago daude). Irudi berean, lurrun-faseko presio totala lurrun-faseko mol-frakzioarekiko irudikatu da ( $P$  vs  $y_A$ ), eta, ikus daitekeen bezala, aldea dago bi lerroen artean. Bi lerro horien artean aldea dagoenez, likidoa eta lurruna batera existitzen diren tenperatura-tarte bat dago. Osagai puruen kasuan, bi lerroak bat datoz.

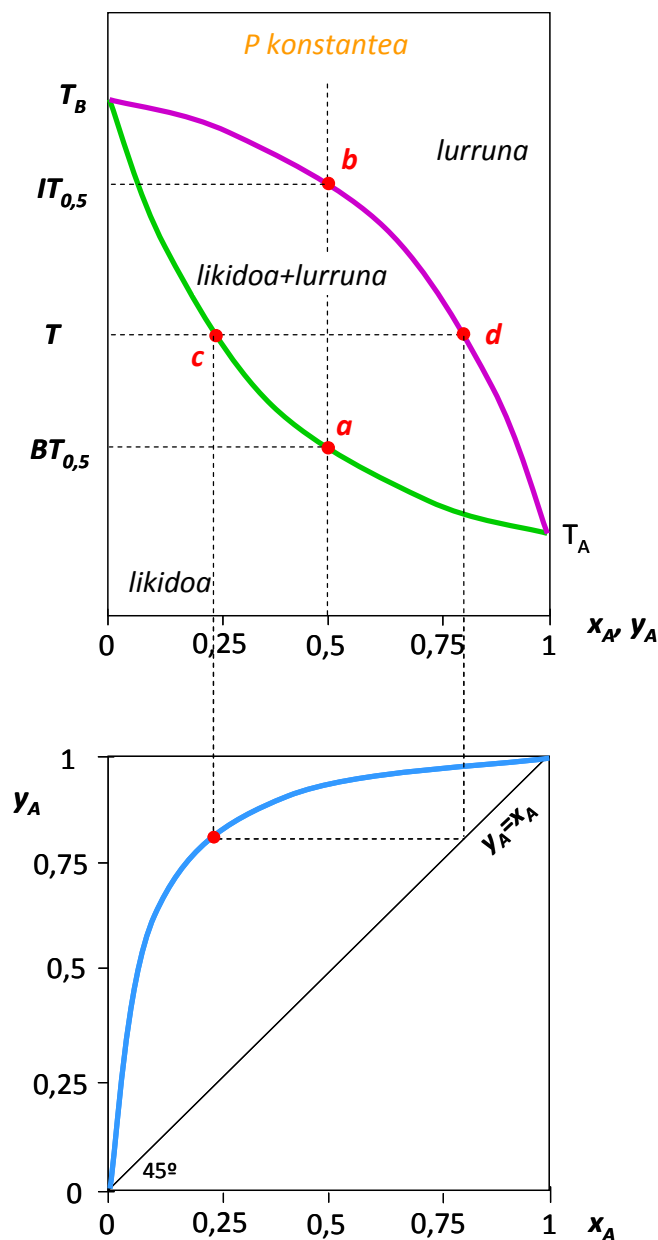
#### 12.2.2 Irakite-tenperaturen diagrama ( $T$ - $x_A$ - $y_A$ diagrama)

Diagrama hau presio konstantean emana dago. Tenperatura bakoitzeko nahastearen likido- eta lurrun-faseetako konposizioak agertzen dira, 12.3 (a) irudian agertzen den bezala.

Likido-egoeran dagoen A osagai purua ( $x_A = 1$ ) berotzen bada, likidoaren tenperaturak gora egiten du. Laneko presioan A-ren irakite-tenperatura ( $T_A$ ) lortzean, A osagaia irakiten hasten da, eta, tenperatura aldatu gabe, lurrun-fasera pasatzen da. Azken likido apurra lurrun bihurtu arte, tenperaturak aldatu gabe dirau. Behin A osagai guztia lurrun-eran dagoenean, tenperatura igotzen hasten da.  $T_A$  baino tenperatura altuagoetan, A osagai guztia lurrun-eran dago ( $y_A = 1$ ). Osagai astun puruari (B) gauza bera gertatzen zaio bere irakite-tenperaturan ( $T_B$ ).

Nahaste bitarren portaera erabat bestelakoa da. Demagun likido-egoeran dagoen A eta B-ren nahaste ekimolekularra ( $x_A = 0,5$ ) berotzen dela. Nahastea berotzean, nahastearen egoera adierazten duen puntua absiza berean bertikalki gora doa, dagokion tenperatura arte.

$T_A$  tenperaturan, oraindik ez da irakiten hasi, eta likido-egoeran dirau. **a** puntuko tenperatura hartzen duenean, lehen lurrun-burbuila sortzen da likidoaren muinean (irakiten hasten da). Tenperatura horri **burbuila-tenperatura** deritzen. Gehiago berotzean, orekan dauden bi faseak (likidoa eta lurruna) batera existitzen dira.  $T$  tenperaturan, **c** likido-fasea eta **d** lurrun-fasea egongo lirateke orekan,  $x_A$  eta  $y_A$  konposizioekin, hurrenez hurren.



12.3. irudia. (a) Nahaste idealaren  $T$ - $x_A$ - $y_A$  edo irakite-temperaturen diagrama. (b)  $x_A$ - $y_A$  edo oreka-diagrama.

Ohartu gaitzen lurrun-fasean (**d** puntuan) osagai lurrunkorrenaren mol-frakzioa hasierako disoluziokoa baino handiagoa dela ( $y_A > 0,5$ ), eta likido-fasean (**c** puntuan), berriz, osagai astunenaren mol-frakzioa hasierako disoluziokoa baino handiagoa dela ( $x_A < 0,5$ ). Nahastea berotzen jarraitzean, gero eta lurrun gehiago eta likido gutxiago egongo litzateke. **b** puntuko temperatura lortzen duenean, hasierako nahastea ia guztiz lurrunduta dago, likido-egoeran azken hondarra besterik ez baita gelditzen. Temperatura horri **ihintz-temperatura** deritzen, eta hori baino temperatura altuagoan,  $y_A = 0,5$  konposizioko lurrun-fasea besterik ez dago. Alderantziko prozesuan lurrun-faseko nahastea ( $y_A = 0,5$ ) hoztean,  $T_B$  lortu arren, nahasteak lurrun-fasean dirau. Temperatura baxuago bateraino hoztu beharko litzake lurrunaren muinean lehen likido-tanta sortu arte (kondentsatzen hasteko): hori **b** puntuko ihintz-temperatura hartzean gertatzen da.

Jatorrizko konposizio desberdinekin lortzen diren burbuila-tenperatura guztiak lerro batez doitzen badira, burbuila-tenperaturen lerroa lortzen da. Lerro horrek  $T-x_A$  erlazioa ematen du, hau da, konposizio bakoitzeko nahastea zer tenperaturatan irakiten hasten den. Era berean, ihintz-tenperatura guztiak lerro batez doitzen badira, konposizio bakoitzeko nahasteak irakiteari zer tenperaturatan uzten dion jakin daiteke ihintz-tenperaturen lerroa lortzen baita. Ohartu gaitezen osagai puruetan berdinak direla burbuila- eta ihintz-tenperaturak.

Irakite-tenperaturen diagrama fase-diagrama ere bada, tenperatura eta konposizio bakoitzean dauden faseen berri ematen baitu. Burbuila-tenperaturen azpiko eremu guztian likido-egoera besterik ez dago; eta ihintz-tenperaturen goiko eremu guztian lurrun-fasea besterik ez dago. Bi lerroen arteko eremuan, bi faseak (likidoa eta lurruna) orekan batera existitzen dira.

Burbuila-tenperaturen lerroak eta ihintz-tenperaturen lerroak ixten duten azalerak bereizte-eremua osatzen du. Nahaste bitarren bereizte-maila handiagoa izan dadin ( $y_A$  eta  $x_A$  desberdinagoak izan daitezen), bi lerroek ahalik eta banatuen egon behar dute.

Irakite-tenperaturen diagrama eraikitzeko, Raoult-en legetik abiatzen da (12.4 ekuazioa). Gainera,

$$y_A = \frac{P_A}{P} \quad (12.6)$$

izanik, ekuazio hauek lortzen dira:

**Burbuila-tenperaturen lerroa:**

$$x_A = \frac{P - P_B^0}{P_A^0 - P_B^0} \quad (12.7)$$

**Ihintz-tenperaturen lerroa:**

$$y_A = \frac{P_A^0}{P} \cdot x_A \quad (12.8)$$

Osagai lurrunkorrenaren eta osagai astunenaren lurrun-presioen arteko erlazioa **lurrunkortasun erlatibo** deritzo ( $\alpha_{AB}$ ).

$$\alpha_{AB} = \frac{P_A^0}{P_B^0} = \frac{\left( \frac{y_A}{x_A} \right)}{\left( \frac{y_B}{x_B} \right)} \quad (12.9)$$

Nahaste bitarra bereizteko erraztasunaren berri ematen du horrek: zenbat eta handiagoa  $\alpha_{AB}$ , orduan eta hein desberdinagoan bihurtzen dira bi osagaiak lurrun. Ohartu gaitezen  $\alpha_{AB} = 1$  denean bi osagaiak hein berean pasatzen direla lurrun-fasera, eta, hala, lurrun-likido orekan oinarritutako eragiketaz (destilazioa, adibidez) nahastea bereiztezina da.

Hainbat kasutan, batez ere nahaste idealetan, lurrunkortasun erlatiboa konstantetzat har daiteke konposizio-tarte guztirako, eta oreka-konposizioak erlazionatzeko adierazpen hau erabil daiteke:

$$y_A = \frac{\alpha_{AB} \cdot x_A}{1 + (\alpha_{AB} - 1) \cdot x_A} \quad (12.10)$$

### 12.2.3 Oreka-konposizioen diagrama ( $x_A$ - $y_A$ diagrama)

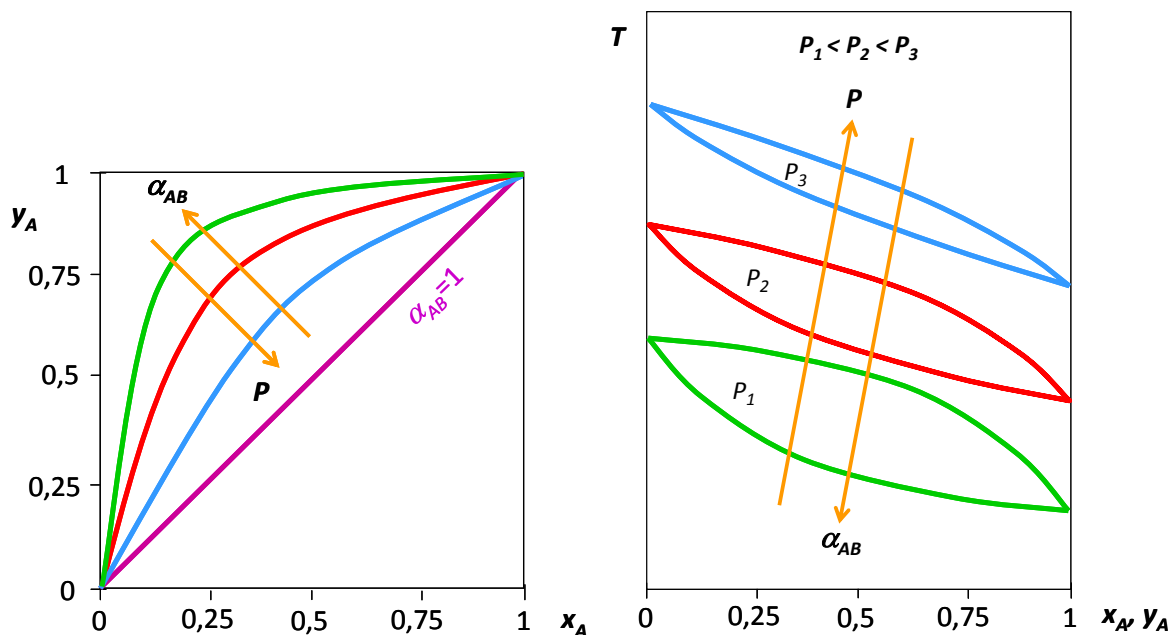
Presio konstantean emandako diagrama honek orekan dauden likido- eta lurrun-faseetako konposizioak erlazionatzen ditu (mol-frakzioetan emanda). Diagrama hau eraikitzeke, lurrun-tenperaturen diagramatik abiatzen da: tenperatura bakoitzerako  $x_A$  eta  $y_A$ -ren balioak irudikatzen dira, eta 12.3 (b) irudian bezalako diagramak lortzen dira.

Era berean, lerro diagonal (45° lerroa edo  $x_A = y_A$ ) marrazten da, lagungarria baita. 12.3 (a) irudian ikusten denez, tenperatura guztietan —osagai puruen irakite-tenperaturetan izan ezik—  $x_A < y_A$  denez, diagrama honetan, oreka puntuek diagonalaren goialdean egon behar dute. Ohartu gaitetzen osagai puruak dauzkagunean oreka-puntuak diagonalan daudela, zeren  $x_A = y_A$  baita.

### 12.2.4 Presioaren eragina $T$ - $x_A$ - $y_A$ eta $x_A$ - $y_A$ diagrametan

Irakite-tenperaturen diagrama presio desberdinetan eraikitzen bada, irakite-tenperaturak aldatu egiten direnez, beste diagrama batzuk lortuko dira. Presioa handitzean irakite-tenperaturak altuagoak dira —bi lerroak tenperatura altuagoetara aldatzen dira—, eta, gainera, bi lerroak bata bestetik gertuago daude ( $\alpha_{AB}$  txikiagoa da). 12.4 irudian agertzen da, eskematikoki, presioa handitzeak irakite-tenperaturen eta oreka-konposizioen diagrametan zer eragin daukan.

Presio altuetan likido- eta lurrun-faseetako konposizioak ( $x_A$  eta  $y_A$ , hurrenez hurren) berdinagoak dira presio baxuetakoekin alderatuz (presio altuetan  $\alpha_{AB}$  txikitu egiten da). Horregatik, destilazioa eraginkorragoa izan dadin, ahalik eta presio baxuenean egiten da (sarri, presio atmosferikoaren azpitik).



12.4 irudia. Presioaren eragina  $T$ - $x_A$ - $y_A$  eta irakite-tenperaturen diagrametan.

### Adibidea 12.1 adibidea

$n$ -heptanoz ( $C_7$ ) eta  $n$ -oktanoz ( $C_8$ ) osatutako sistemak Raoult-en legea betetzen dutela suposatuz (konposatuaren egitura kimikoa antzekoa izanik, suposizio egokia da), 101,33 kPa-eko presioko oreka-diagramak irudikatuko dira. Era berean, 385 K-eko lurrun-presioaren diagrama irudikatuko da.

Antoine-ren ekuazioan erabiltzeko konstanteen balioak hurrengo taulakoak dira,  $P^0$  kPa-etan eta T K-etan izanik:

Konposatua	A	B	C
n-heptanoa	13,9008	2932,72	-55,6356
n-oktanoa	14,2368	3304,16	-55,2278

**Ebazpena**

Lehenik eta behin, 101,33 kPa presioan osagai bakoitzak duen irakite-temperatura kalkulatu da:

$$\left. \begin{aligned} \ln 101,33 &= 13,9008 - \frac{2932,72}{T_{C_7} - 55,6356} \\ \ln 101,33 &= 14,2368 - \frac{3304,16}{T_{C_8} - 55,2278} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} T_{C_7} &= 371,6 \text{ K} \\ T_{C_8} &= 398,8 \text{ K} \end{aligned}$$

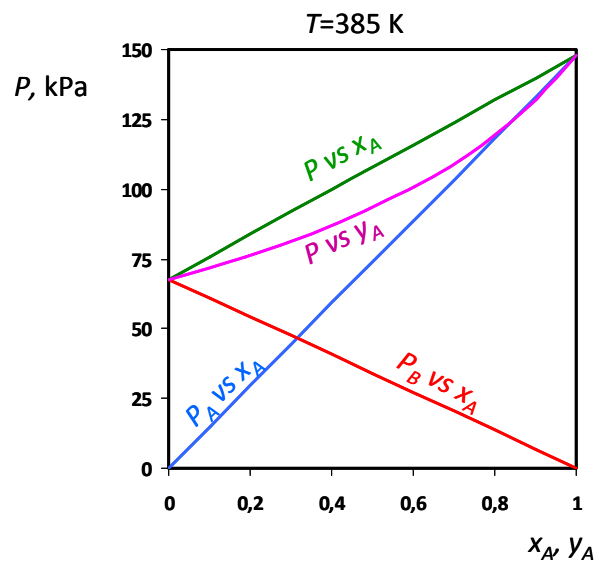
Osagai lurrunkorrena  $C_7$  da (arestian erabiltako ekuazioetan A osagaia, alegia).

Lurrun-presioen diagrama 385 K-ean

Temperatura horretan osagai bien ( $C_7$  eta  $C_8$ ) lurrun-presioak 147,9 eta 67,8 kPa dira, hurrenez hurren. 1 taulan agertzen dira kalkulatuak balioak.

1 taula: oreka-datuak 385 K-ean

$x_{C_7}$	$P_{C_7}$ (kPa)	$P_{C_8}$ (kPa)	$P$ (kPa)	$y_{C_7}$
0	0	67,8	67,8	0
0,1	14,8	61,1	75,9	0,19
0,2	29,6	54,3	83,9	0,35
0,3	44,4	47,5	91,9	0,48
0,4	59,2	40,7	99,9	0,59
0,5	74,0	33,9	107,9	0,69
0,6	88,7	27,1	115,9	0,77
0,7	103,5	20,4	123,9	0,84
0,8	118,3	13,6	131,9	0,90
0,9	133,1	6,8	139,9	0,95
1	147,9	0	147,9	1



T-x-y eta x-y oreka-diagramak 101,33 kPa-ean.

101,33 kPa-eko presioan bi osagaien irakite-temperaturak finkatuta izanik (371,6 eta 398,8 K), tarte horretarako tenperaturaren balio batzuk hartu dira, eta 2 taula bete da.

2 taula: oreka-datuak 101,33 kPa-ean

T(K)	$P^0_{C_7}$ (kPa)	$P^0_{C_8}$ (kPa)	$\alpha_{AB}$	$x_{C_7}$	$y_{C_7}$
371,6	101,33	44,38	2,28	1	1
372,5	104,10	45,72	2,28	0,95	0,98
375	111,92	49,60	2,26	0,83	0,92
377,5	120,20	53,74	2,24	0,72	0,85
380	128,94	58,15	2,22	0,61	0,78
382,5	138,17	62,85	2,20	0,51	0,70
385	147,91	67,85	2,18	0,42	0,61
387,5	158,17	73,16	2,16	0,33	0,52

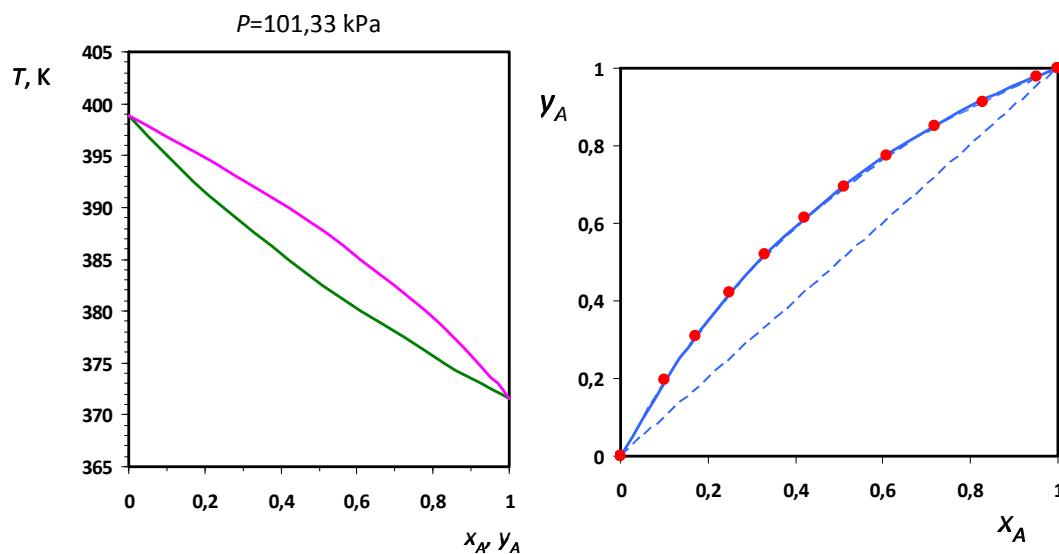


2 taula. jarraipena					
390	168,98	78,80	2,14	0,25	0,42
392,5	180,34	84,78	2,13	0,17	0,31
395	192,29	91,12	2,11	0,10	0,19
398,8	211,60	101,33	2,09	0	0

2 taulako datuen arabera, tenperatura-tarte osorako nahastearen lurrunkortasun erlatiboaren batez besteko balioa 2,19 delako:

$$y_A = \frac{2,19 \cdot x_A}{1 + 1,19 \cdot x_A}$$

$y_A$  vs.  $x_A$  diagraman ekuazio horrekin (hurbilketa) irudikatzen den oreka-diagrama puntuen bitartez marraztuta azaltzen da.



### 12.3 NAHASTE IDEALEKIKO DESBIDERATZEAK

Nahaste guztiak, ordea, ez dira arestian aipatutako ekuazioetara doitzen. Disoluzio oso diluituetan, Henry-ren legea betetzen da. Horren arabera, osagai baten gasaren presio partziala likido-faseko mol-frakzioarekiko proportzionala da, baina ez lurrun-presioaren adinakoa:

$$P_A = H_A \cdot x_A \quad (12.11)$$

Disoluzioa osatzen duten bi substantziaren egitura kimikoak desberdintzen diren heinean, idealtasunarekiko (Raoult-en legearekiko) desbideratzea handiagoa da. Hainbat nahaste bitarren kasua da hori. Adibidez, ura eta etanola nahasten direnean, bolumen osoa osagaien bolumenen batura baino txikiagoa da.

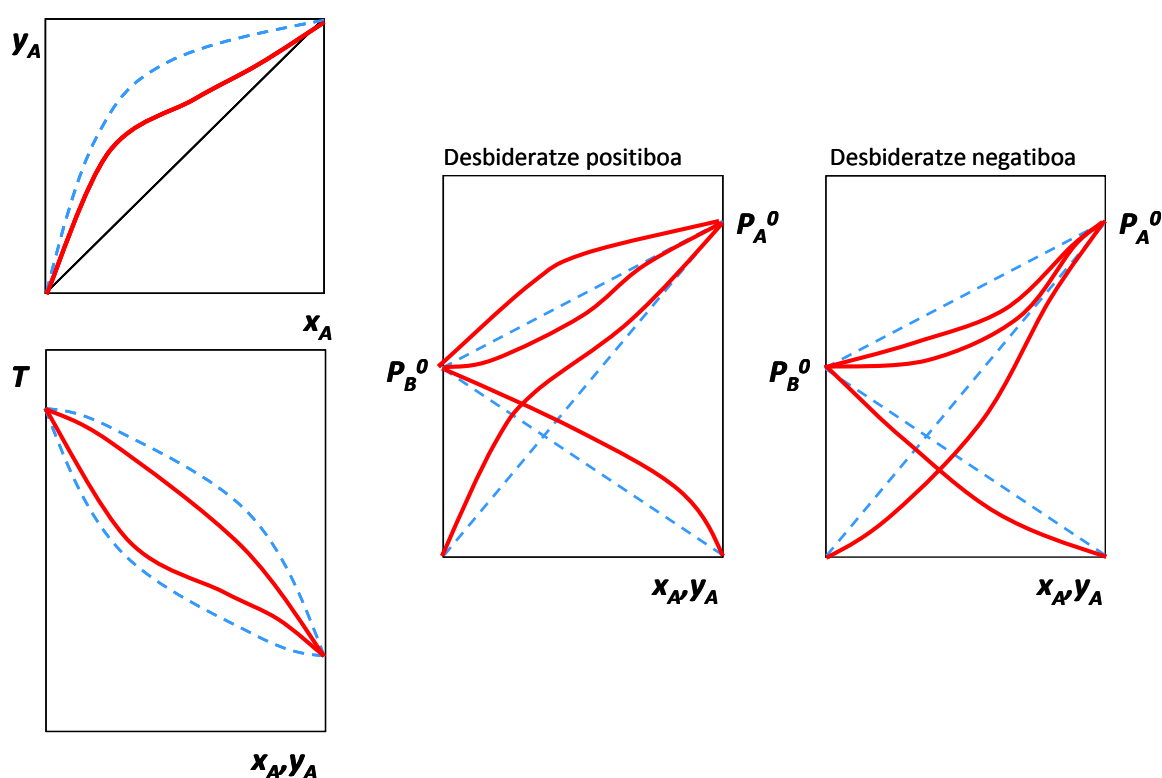
Desbideratzeak kontuan hartzeko, Raoult-en legea moldatzen duen lege empiriko hau erabil daiteke:

$$P_i = \gamma_i \cdot P_i^0 \cdot x_i \quad (12.12)$$

$\gamma_i$ , likido-faseko  $i$  osagaiaren aktibitate-koefizienteak izanik.  $i$  osagaia oso kontzentratua denean, aktibitate-koefizienteak batera jotzen du. Disoluzioa ideala denean, beraz,  $\gamma_A = \gamma_B = 1$  da. Aktibitate-koefizienteak kalkulatzeko Van Laar, Wilson edo Margules-en metodoak erabil daitezke.

Nahastea osatzen duten molekulak oso desberdinak badira, aldaratze-indarrak sor daitezke konposatu desberdinetako molekulen artean. Idealtasunarekiko desbideratze horri desbideratze positibo deritzo ( $\gamma_i > 1$ ), eta nahaste gehienek dute portaera hori. Adibidez, molekula polarrak (uraren kasua) eta ez-polarrak (hidrokarburo organikoak) nahastean, aldaratze-indar izugarriak sortzen dira. Horrelako sistemetan, konposatuaren aktibitate-koefizienteak bat baino handiagoak izaten dira, eta lurrunean, Raoult-en legeak ematen duena baino kantitate gehiago dago osagai bakoitzetik.

Bestalde, molekulen artean erakarpen-indarrak sortzen badira, esaten da Raoult-en legearekiko desbideratze negatiboa dutela, eta aktibitate-koefizienteak bat baino txikiagoak dira (lurrunean, Raoult-en legeak ematen duena baino kantitate gutxiago dago) ( $\gamma_i < 1$ ). Horrelakoak dira, adibidez, hidrogeno-zubiak sortzen dituzten nahasteak. Desbideratzeak oso handiak direnean, azeotropoak sor daitezke.



12.5 irudia. Benetako disoluzioen  $T$ - $x_A$ - $y_A$  eta  $x_A$ - $y_A$  oreka-diagramak eta nahaste ez-idealen lurrun-presioen diagrama: desbideratze positiboduna eta negatiboduna (disoluzio idealen marrak ez-jarraitu eta urdinak dira).

## 12.4 NAHASTE AZEOTROPIKOAK

Idealtasunarekiko desbideratzeak oso handiak direnean, **azeotropo** deritzen nahaste mota bereziak sor daitezke. Nahaste azeotropikoen irakite-tenperatura konstantea da (burbuila-eta ihintz-tenperaturak berdinak dira), eta, ondorioz,  $y_A = x_A$  denez,  $\alpha_{AB} = 1$  da —lurrun-faseko eta likido-faseko konposizioak berdinak dira—. Horregatik, ezinezkoa da azeotropo bat destilazio arruntaz bereiztea, baina gerta daiteke baldintzak aldatzean (presioa) azeotropoa desagertzea.

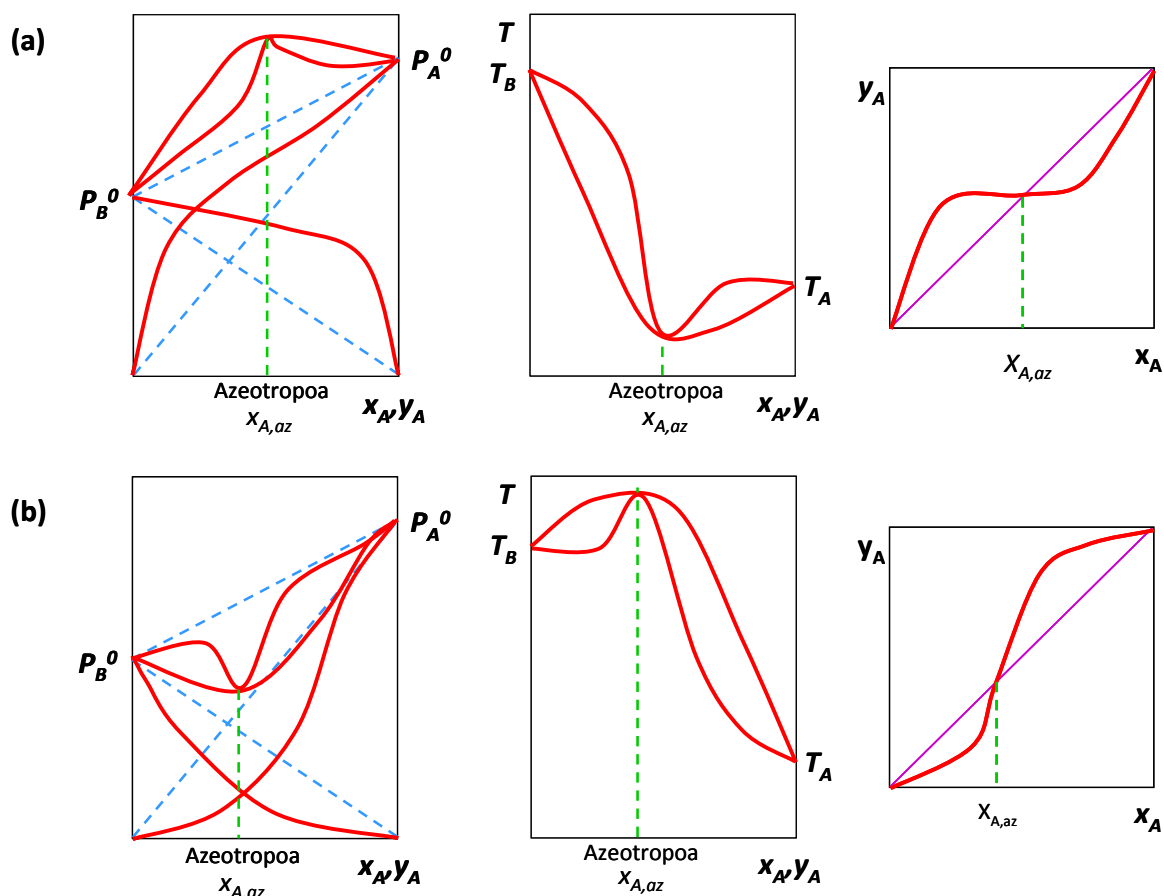
Azeotroparen irakite-tenperatura osagai lurrunkor puruarena baino baxuagoa (**irakite-tenperatura minimoko azeotropoa**) edo osagai astun puruarena baino altuagoa (**irakite-tenperatura maximoko azeotropoa**) izan daiteke. Lehenengoek desbideratze positiboa dute,

eta azkenengok, desbideratze negatiboa. 12.1 taulan azeotropoen adibide batzuk agertzen dira.

**12.1 Taula.** Nahaste azeotropikoen adibideak.

Azeotropoaren konposizioa (molen %) eta Irakite-temperatura normalak (1 atm)	
<b>Irakite-temperatura minimoko azeotropoak</b>	<b>Irakite-temperatura maximoko azeotropoak</b>
Ura (% 10,6) – Etanola (% 89,4) $T = 78,2 \text{ }^\circ\text{C}$	HCl (% 11,1) – Ura (% 88,9) $T = 110 \text{ }^\circ\text{C}$
$\text{CS}_2$ (% 61,0) – Azetona (% 39,0) $T = 39,25 \text{ }^\circ\text{C}$	Azetona (% 65,5) – Kloroformoa (% 34,5) $T = 64,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Bentzenoa (% 29,6) – Ura (% 70,4) $T = 69,25 \text{ }^\circ\text{C}$	$\text{HNO}_3$ (%40,4) – Ura (%59,6) $T = 122 \text{ }^\circ\text{C}$

12.6 irudian agertzen dira idealtasunarekiko desbideratzeak oso handiak direnean sortzen diren azeotropoen oreka-diagramak.



**12.6 irudia.** (a) Irakite-temperatura minimoko azeotrope baten oreka-diagramak, (b) irakite-temperatura maximoko azeotropoaren oreka-diagramak.  $x_{A,az}$  azeotropoan A osagaien mol-frakzioa.

Irakite-temperatura minimoko azeotropea osa dezakeen nahaste batean (12.6(a) irudia) konposizio azeotropikoari dagokiona baino osagai lurrunkor gutxiago badago ( $0 < x_A < x_{A,az}$ ), bi faseak batera existitzen diren eremuan osagai lurrunkorra nagusitzen da lurrunean ( $x_A < y_A$ ). Baldin eta nahasteak konposizio azeotropikoak baino osagai lurrunkor gehiago badauka ( $x_{A,az} < x_A < 1$ ), lurrunean osagai astunena nagusitzen da ( $x_A > y_A$ ) —ezohiko portaera da—.

Bestalde, irakite-tenperatura maximoko azeotropoa osa dezakeen nahastean (12.6(b) irudia) konposizio azeotropikoari dagokiona baino osagai lurrunkor gutxiago badago —ezohiko portaera da—, osagai astuna nagusituko da lurrunean; aldiz, nahastean osagai lurrunkorrenaren konposizioa konposizio azeotropikoa baino handiagoa bada —ohiko portaera—, osagai lurrunkorrena nagusituko da lurrunean. Era berean, konposizio azeotropikoa baldin badago, osagai lurrunkorrenaren mol-frakzioa berdina da lurrunean eta likidoan.

## 12.5 LIKIDO-LURRUN OREKAN OINARRITUTAKO BEREIZTE-ERAGIKETAK: DESTILAZIOA

Masa-transferentzian oinarritutako bereizte-eragiketeta da destilazioa, eta likidoaren eta lurrunaren arteko kontaktua gertatzen da. Osagaien lurrunkortasunak desberdinak badira, osagai lurrunkorrena proportzio handiagoan pasatuko da lurrunera likido-lurrun faseartean zehar. Bi osagaien lurrunkortasun erlatiboa batekoa ez bada, nahasteak destilazior bereiz daitezke.

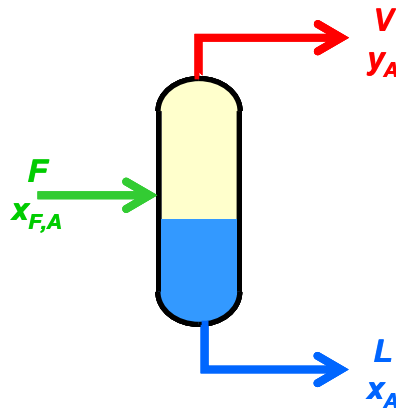
Gizakiak nahasteak bereizteko erabili duen lehenengo eragiketetako bat da destilazioa (pattar alkoholikoen ekoizpena, lekuko). Industrian maiz erabiltzen da gaur egun (petrolioaren fintze-prozesuan, petrokimikan, gas naturalaren prozesamenduan eta abarretan). Ondoren, nahaste bitarren destilazioa azalduko da, konposatu anitzeko nahasteen destilazioak printzipio berdinei jarraitzen baitie. Askoz ere sinpleagoa denez nahaste bitarren destilazioa aztertzea konposatu anitzen nahasteen destilazioa aztertzea baino, horixe aztertuko dugu. Bi destilazio mota bereiziko dira:

- (a) **Destilazio bakuna.** Bereizi nahi den nahastea tenperatura eta presio egokira eramaten da; sortzen den lurruna (azeotroporik osa ez badezake) osagai lurrunkorrenaz aberasten da, eta, gero, likido-fasetik bereizten da. Destilazio bakunen artean **bat-bateko destilazioa** (*flash* edo orekako izenez ere ezaguna) eta **destilazio diferentziala** bereizi daitezke. Destilazio bakuna eraginkorra da lurrunkortasun erlatibo handiko nahasteak bereizteko, baina purutasun handia lortu nahi denean, ez dira eraginkorrak.
- (b) **Errektifikazio-destilazioa.** Konposatuak purutasun handiz lortu nahi direnean erabiltzen da. Destilagailu-ontziaren goialdean zutabe bat erabiltzen da. Zutabearen goialdetik irteten den lurruna (osagai lurrunkorrenetan aberatsa) kondentsatu egiten da; kondentsatu horren zati bat (errefluxua) zutabera itzultzen da likido-eran, eta beste zati bat, ordea, produktu gisa (destilatua) kanporatzen da. Zutabearen kontrakorrantean jartzen dira kontaktuan gorantz doan lurruna eta beherantz doan likidoa, eta, hala, etengabeko lurruntze eta kondentsatze partzialak gertatzen dira. Horrenbestez, masa-transferentzia areagotu egiten da, eta destilatuan osagai purua nahi bezainbesteko purutasunaz lor daiteke (orekak eskaintzen duen mugaren barruan).

### 12.5.1 Bat-bateko destilazioa (*flash* edo orekako)

Lurrunkortasun erlatibo handiko nahasteak bereizteko erabiltzen da, baina bereizte-maila handia behar denean ez da hain eraginkorra. Elikadura likidoa ( $F$  emari molarra,  $A$ -ren mol-frakzioa  $x_{F,A}$ ) presurizatu eta berotu ondoren, iratotze-balbula batetik pasaratzen da faseen bereizketa-ganberara sartzeko. Hala likidoaren lurruntze partziala gertatzen da, hots, bereizte-ganberan orekan dauden bi faseak (likidoa,  $L$  eta lurruna,  $V$ ) bereizi egiten dira, korrante bakoitzean  $A$  osagaiaren mol-frakzioak  $x_A$  eta  $y_A$  izanik (ikus 12.7 irudia). Aurkako

eragiketari kondentsatze partzial deritzo (elikadura lurrun-eran dagoenean). Destilazio honek era jarraituan lan egiten du.



12.7 irudia. Flash destilagailua.

Egoera geldikorraren masa-balantzea egiten bada (mol/t unitatetan):

$$\text{Sistema osoa:} \quad F = L + V \quad (12.13)$$

$$\text{A osagaia:} \quad F \cdot x_{F,A} = L \cdot x_A + V \cdot y_A \quad (12.14)$$

Bi ekuazioak konbinatuz, **eragiketa-lerroa** deritzon adierazpena lortzen da:

$$y_A = \frac{F \cdot x_{F,A}}{V} - \frac{L}{V} \cdot x_A \quad (12.15)$$

Destilagailuak behar den bezala lan egiten badu, likido- eta lurrun-faseak orekan irteten direnez, oreka-erlazioa beteko da:

$$y_A = f(x_A) \quad (12.16)$$

Lurrunkortasun erlatiboa konstantea bada, 12.10 ekuazioko oreka-erlazioa erabil daiteke.

### Ebazpen analitikoa

Destilagailutik irteten diren bi faseetako emariak eta konposizioak kalkulatzeko, (12.13-12.16) ekuazioak batera ebatzi behar dira.

### Ebazpen grafikoa

(12.13-12.16) ekuazioak  $T$ - $x_A$ - $y_A$  edo  $x_A$ - $y_A$  oreka-diagrametan ebazten dira grafikoki.

$x_A$ - $y_A$  oreka-diagraman (12.15) ekuazioa ( $-L/V$ ) maldako lerro zuzena da.  $x_A = x_{F,A}$  denean,  $y_A = x_{F,A}$  denez, eragiketa-lerroaren abiapuntua ( $F$ ) diagonalean dago ( $x_{F,A}, x_{F,A}$ ) puntuan. Ftik abiatuz, ( $-L/V$ ) maldako lerro zuzenak eta oreka kurbak bat egiten duten puntuak irteerako konposizioak ematen ditu (12.8(a) irudia). Diagrama horrek ez du adierazten, ordea, destilazioa zer tenperaturatan egin behar den.

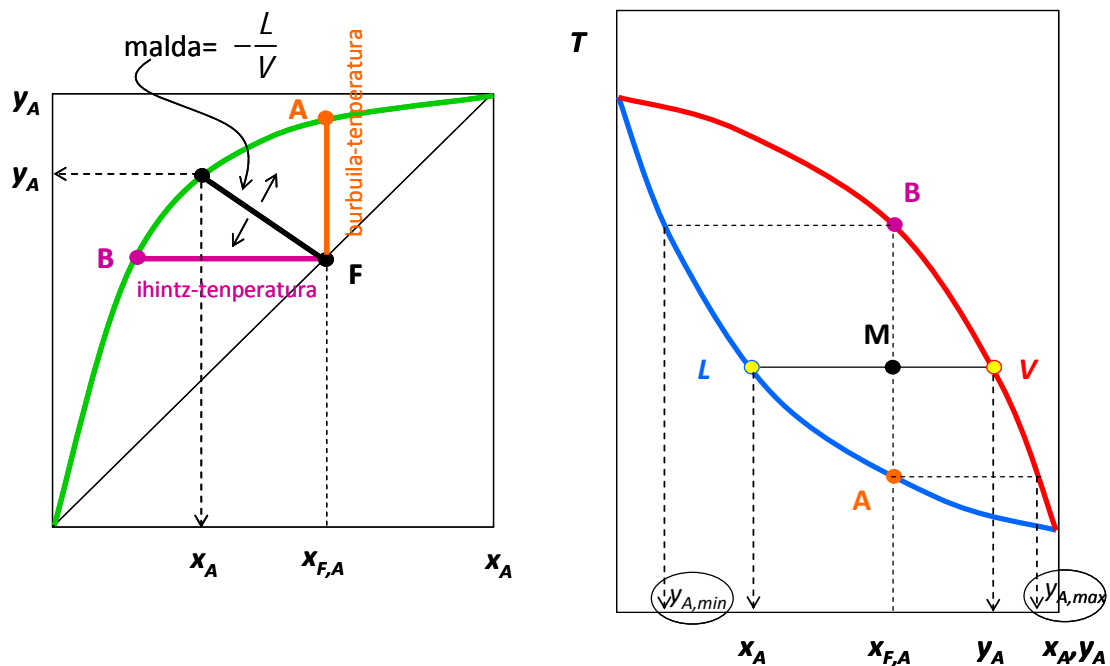
Destilagailuaren eragiketa-malda balio maximo ( $-L/V = -\infty$ ) eta minimo ( $-L/V = 0$ ) baten artean mugatuta dago. Likidoa eta lurruna, bi faseak, batera egon daitezten, nahastearen burbuila-tenperatura eta ihintz-tenperaturaren tartean lan egin behar da: lehen kasuan, nahastearen zatirik handienak likido-egoeran dirau, lehen lurrun-burbuila sortzen da ( $F \approx L$  eta  $V \approx 0$ ) eta  $-L/V = -\infty$  da (12.8 irudiko A puntua). Bigarren kasuan, nahastearen zatirik handiena lurrunduta dago eta azken likido apurra geratzen da ( $F \approx V$  eta  $L \approx 0$ ), eta ( $-L/V = 0$ ) da (12.8 irudiko B puntua).

Masa-balantzea  $T-x_A-y_A$  diagraman ere ebatz daiteke, eta destilazioa zer tenperaturatan egiten den adierazten du.  $T-x_A-y_A$  diagraman orekako faseen erregela (edo palankaren erregela) erabil daiteke. Nahastea M puntura eramatean, orekan dauden  $L$  eta  $V$  faseetan banatzen bada:

$$L \cdot \overline{LM} = V \cdot \overline{MV} \quad (12.17)$$

$\overline{LM}$  eta  $\overline{MV}$  luzerak 12.8 irudiko grafikoa neurtzen dira erregela baten bidez.

Flash destilazio bakarrarekin, burbuila-tenperaturan edo ihintz-tenperaturan lan eginez lortzen dira bereizte-maila handienak. 12.8 irudiko  $T-x_A-y_A$  diagramari erreparatuta, osagai lurrunkor puruena destilazioa A puntuan egitean lortuko da (sortzen den lurrunean  $y_A$  maximoa izango da), eta B puntuen lan eginez lortuko da B osagai puruena ( $x_A$  minimoa). Hala ere, ezinezkoa da horrela lan egitea, lurrun-emari (lehen kasuan) eta likido-emari (azken kasuan) guztiz baztergarriak lortuko bailirateke.



12.8 irudia. Flash destilazioa: masa-balantzearen ebazpen grafikoa.

**Adibidea** 12.2 adibidea

Moletan % 50 *n*-heptanoz ( $C_7$ ) eta % 50 *n*-oktanoz ( $C_8$ ) osatutako nahaste baten 1000 mol/h bereizi nahi da flash destilazioz 101,33 kPa-eko presioan, *n*-heptanoa % 65 izan arte. Kalkula ditzagun (a) destilagailutik irteten diren bi faseen emariak (b) beste fasearen konposizioa (c) destilazioa zer tenperaturatan egin behar den.

*Ebazpena*

1 adibidean lortu dira  $T-x_A-y_A$  eta  $x_A-y_A$  datuak, eta  $y_A = \frac{2,19 \cdot x_A}{1 + 1,19 \cdot x_A}$  ekuazioak  $x_A-y_A$  datuak

doitzen dituela ikusi da.

Masa-balantzeak egiten badira mol/h-etan:

Sistema osoa:  $1000 = L + V$

$C_7$  osagaia:  $1000 \cdot 0,5 = L \cdot x_{C7} + V \cdot y_{C7}$

$C_7$  osagai lurrunkorrena izanik,  $C_7$  nagusitzen da lurrunean, eta, horregatik,  $y_{C7} = 0,65$  izan behar denez:  $500 = L \cdot x_{C7} + V \cdot 0,65$

### Ebazpen analitikoa

Likidoa eta lurruna orekan irteten direnez,  $0,65 = \frac{2,19 \cdot x_{C7}}{1 + 1,19 \cdot x_{C7}}$  da. Hortik,  $x_{C7} = 0,46$  lortzen

da.

Masa-balantzeetan ordezkatzuz,  $L = 789,5$  mol/h eta  $V = 210,5$  mol/h emariak lortuko dira. Ebazpen analitikoaren bidez destilazio-tenperatura jakiteko, orekako datuak eraikitzeko erabilitako Antoine-ren ekuaziora joan behar da.

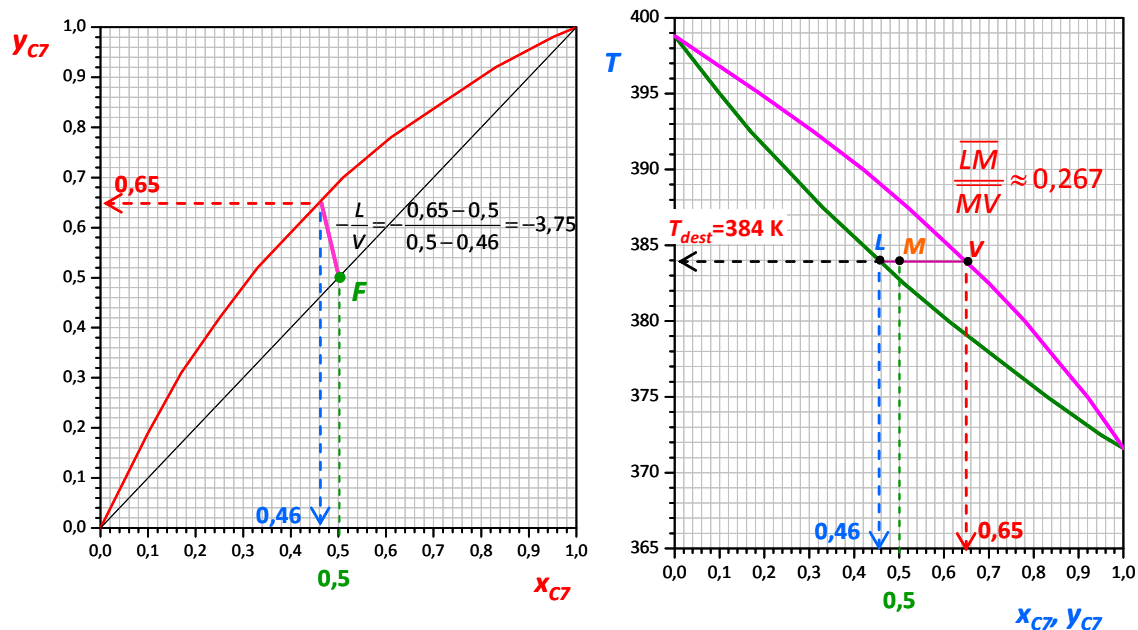
### Ebazpen grafikoa ( $x_A$ - $y_A$ diagraman)

Elikadura-puntua ( $F$ ) kokatu ondoren (diagonalean,  $x_{C7} = y_{C7} = 0,5$ ) destilagailuaren eragiketa-puntua kokatu behar da. Irteerako lurrunean  $y_{C7} = 0,65$  da, eta puntu hori oreka-marraren gainean dago.  $F$  eta irteerako puntua lerro zuzen batez (eragiketa-lerroa) lotzean,  $x_{C7} = 0,46$  kalkulatzen da. ( $-L/V$ ) = -3,75 denez, masa-balantzean ordezkatzuz,  $L$  eta  $V$  kalkulatzen dira (789,5 eta 210,5 mol/h, hurrenez hurren).

### Ebazpen grafikoa ( $T$ - $x_A$ - $y_A$ diagraman)

Elikaduran  $n$ -heptanoaren mol-frakzioa 0,5 da eta bertikalean gora eramaten da,  $M$  punturaino. Puntu hori ezegonkorra da, eta  $L$  eta  $V$  faseetan bereizten da.  $V$  fasearen kokapena  $y_{C7} = 0,65$  den puntuak ematen du. Tenperatura berean (lerro horizontala),  $L$  puntua kokatzen da eta diagraman  $x_{C7} = 0,46$  konposizioa irakurtzen da.

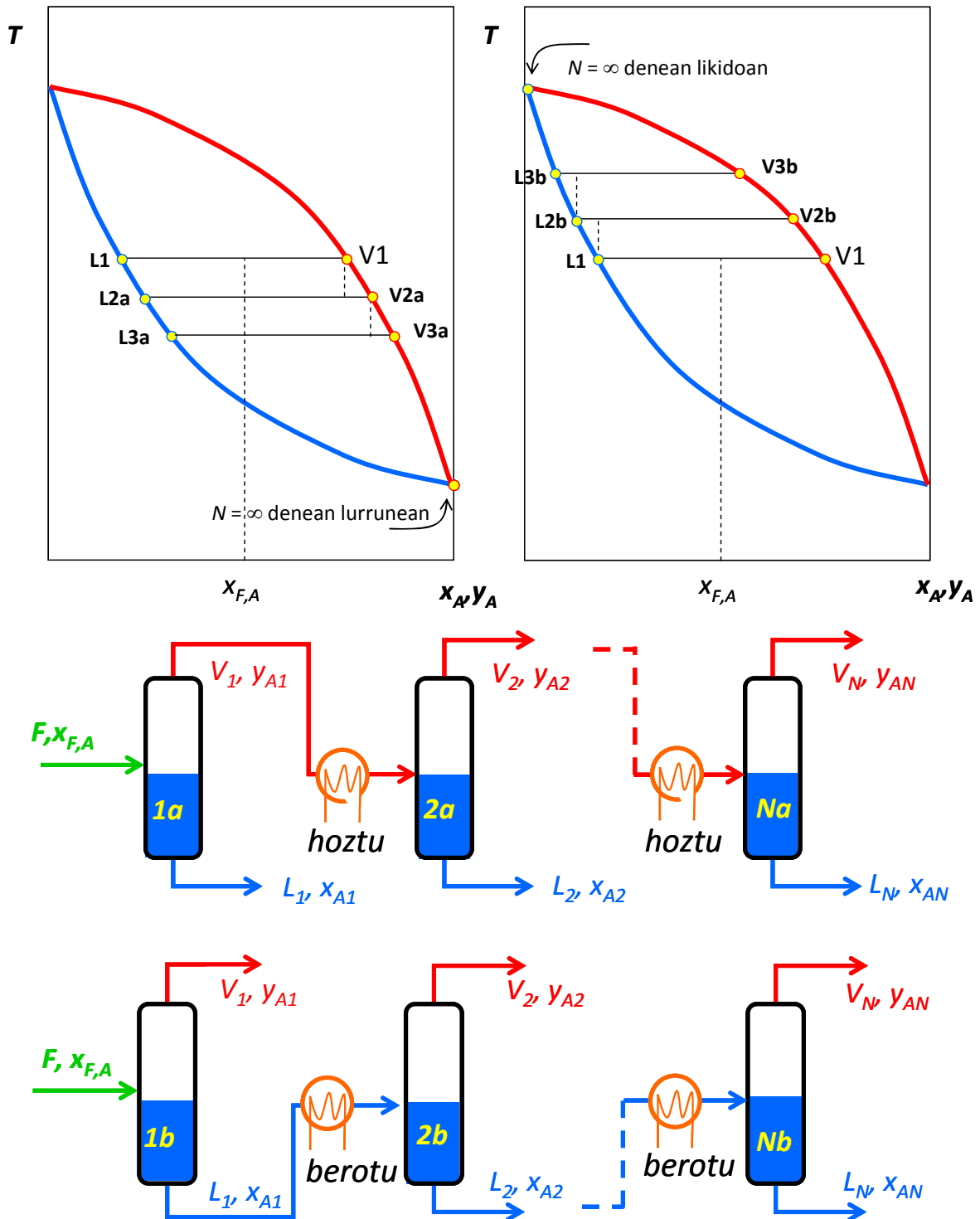
$L$  eta  $V$  korronteen emariak kalkulatzeko palankaren erregela erabiliz,  $\frac{\overline{LM}}{\overline{MV}} \approx 0,267$  lortzen da. Bukatzeko, masa-balantzetik  $L$  eta  $V$  kalkulatzen dira.



### **12.5.2 Bat-bateko destilazioa (flash edo orekako): etapa anitzen sekuentziak**

Arestian aipatu den bezala, flash destilazioa lurrunkortasun-diferentzia handiko osagaiak bereizteko egokia da, eta purutasun handiko konposatuak lortzeko aukera mugatuta dago.

Purutasun handiko konposatuak lortu nahi direnean, seriean kokatutako destilagailuen sekuentziak erabiltzen dira. Osagai lurrunkorraz aberasteko, destilagailu batetik irteten den lurruna hoztu eta hurrengo destilagailua elikatuko da horrekin; horrela, nahi bezain beste urrats egin daitezke (purutasun handiagoa lortzeko, ekipo gehiago behar dira). Modu berean, osagai astunenaz aberastu nahi bada, ekipo batetik irteten den likidoa berotu, eta hurrengo destilagailua elikatzen da horrekin. Eragiketa horien azalpen grafikoa 12.9(a) irudian agertzen da, eta 12.9(b) irudian, destilagailu sekuentzien topologia azaltzen da.



12.9. irudia. Flash destilagailuen sekuentziak (a) osagai lurrunkorrena aberasteko, (b) osagai astunena aberasteko.



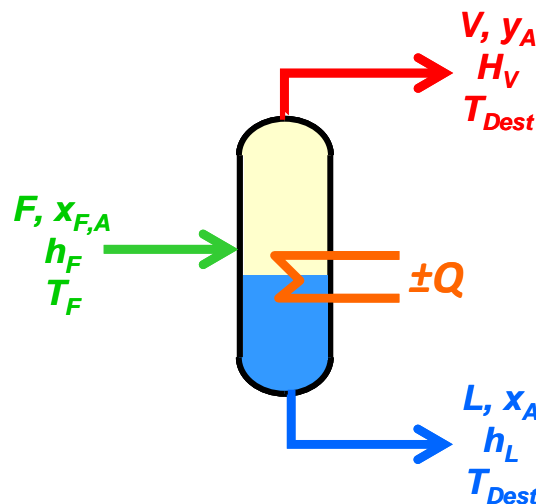
### 12.5.3 Bat-bateko destilazioa gauatzeko behar den beroaren kalkulua: entalpia-balantzeak

Egoera geldikorrean, entalpia-balantzeak adierazpen honi jarraitzen dio, energia/denbora eran:

$$F \cdot h_F + Q = V \cdot H_V + L \cdot h_L \quad (12.18)$$

$h_F$ ,  $H_V$  eta  $h_L$  elikaduraren eta lurrun- eta likido-faseen entalpia molarrak dira.  $Q$ , inguruarekin trukutzen duen beroa da.

Prozesua adiabatikoa bada,  $Q = 0$  izango da, eta, beraz, destilazioa gauatzeko, elikadurak energia izan beharko du.



### 12.10. irudia. Korronteen entalpiak Flash destilazioan.

Hiru korronteen entalpiak honela kalkulatu dira:

Elikadura-korrontea:

$$h_F = x_{F,A} \cdot \int_{T_{Erref}}^{T_F} C_{P_{A,F}} \cdot dT + (1 - x_{F,A}) \cdot \int_{T_{Erref}}^{T_F} C_{P_{B,F}} \cdot dT \quad (12.19)$$

Korrante likidoa:

$$h_L = x_A \cdot \int_{T_{Erref}}^{T_{Dest}} C_{P_{A,L}} \cdot dT + (1 - x_A) \cdot \int_{T_{Erref}}^{T_{Dest}} C_{P_{B,L}} \cdot dT \quad (12.20)$$

Lurrun-korrontea:

$$H_V = y_A \cdot \left[ \int_{T_{Erref}}^{T_A} C_{P_{A,L}} \cdot dT + \lambda_A + \int_{T_A}^{T_{Dest}} C_{P_{A,V}} \cdot dT \right] + (1 - y_A) \cdot \left[ \int_{T_{Erref}}^{T_B} C_{P_{B,L}} \cdot dT + \lambda_B + \int_{T_B}^{T_{Dest}} C_{P_{B,V}} \cdot dT \right] \quad (12.21)$$

Adierazpen horietan,  $L$  eta  $V$  azpindizek likido- eta lurrun-fasea adierazten dute, hurrenez hurren.  $F$  azpindizeak, berriz, elikadurari dagokion fasea adierazten du.  $T_A$  eta  $T_B$  A eta B osagaien irakite-tenperaturak dira, hurrenez hurren.  $\lambda_A$  eta  $\lambda_B$  A eta B osagaien lurrunketa-beroak (bero sorrak) dira, hurrenez hurren.

## Adibidea

## 2.3 adibidea

12.2 Adibideko destilazioan, kalkula ditzagun (a) destilazioa adiabatikoki gauzatu nahi bada, likido-egoerako elikadura-korrontearen tenperatura, (b) elikadura 350 K-ean badago, ingurunearekin trukatu behar duen beroa.

Datuak:

konposatua	$\overline{C}_{P,L}$ (J/molK)	$\overline{C}_{P,V}$ (J/molK)	$\lambda$ (J/mol)
<i>n</i> -heptanoa (A)	200	220	32100
<i>n</i> -oktanoa (B)	230	250	34900

Ebazpena

12.2 adibidearen arabera,  $F = 1000$  mol/h elikatzean,  $L = 789,5$  mol/h eta  $V = 210,5$  mol/h korronteak lortu dira,  $x_A = 0,46$  eta  $y_A = 0,65$  konposiziodunak.

$T_A = 371,6$  K,  $T_B = 398,8$  K eta  $T_{Dest} = 384$  K dira.

(a) Adiabatikoa bada,  $Q = 0$  da.

Korronteen entalpiak kalkulatu dira.

Elikadura likido-egoeran sartuko da:

$$h_F = 0,5 \cdot \int_{T_{Erref}}^{T_F} 200 \cdot dT + 0,5 \cdot \int_{T_{Erref}}^{T_F} 230 \cdot dT = 215 \cdot (T_F - T_{Erref}) \text{ J/mol}$$

$$h_L = 0,46 \cdot \int_{T_{Erref}}^{384} 200 \cdot dT + 0,54 \cdot \int_{T_{Erref}}^{384} 230 \cdot dT = 216,2 \cdot (384 - T_{Erref}) \text{ J/mol}$$

$$H_V = 0,65 \cdot \left[ \int_{T_{Erref}}^{371,6} 200 \cdot dT + 32100 + \int_{371,6}^{384} 220 \cdot dT \right] + 0,35 \cdot \left[ \int_{T_{Erref}}^{398,8} 230 \cdot dT + 34900 + \int_{398,8}^{384} 250 \cdot dT \right] =$$

$$= -2,08 \cdot 10^5 + 210,5 \cdot T_{Erref} \text{ J/mol}$$

Erreferentzia-tenperatura gisa 384 K hartzen bada, eta energia-balantzea ebazten bada:

$$1000 \left( \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) \cdot 215 \cdot (T_F - 384) \left( \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right) + 0 = 789,5 \left( \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) \cdot 0 + 210,5 \left( \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) \cdot (-1,27 \cdot 10^5) \left( \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right)$$

$T_F = 383,4$  K.

(b) Orain,  $T_F = 350$  K da. Erreferentzia-tenperatura 350 K hartuko da.

$h_F = 0$  J/mol

$$h_L = 0,46 \cdot \int_{350}^{384} 200 \cdot dT + 0,54 \cdot \int_{350}^{384} 230 \cdot dT = 7350,8 \text{ J/mol}$$

$$H_V = 0,65 \cdot \left[ \int_{350}^{371,6} 200 \cdot dT + 32100 + \int_{371,6}^{384} 220 \cdot dT \right] + 0,35 \cdot \left[ \int_{350}^{398,8} 230 \cdot dT + 34900 + \int_{398,8}^{384} 250 \cdot dT \right] = -1,34 \cdot 10^5 \text{ J/mol}$$

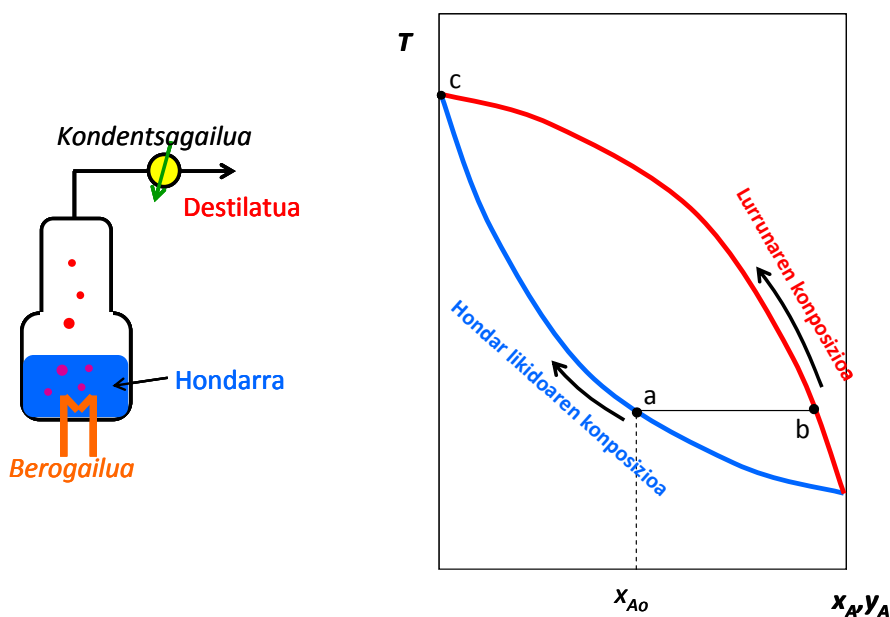
Energia-balantzea askatuz:

$$10^3 \cdot \left( \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) \cdot 0 \left( \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right) + Q = 789,5 \left( \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) \cdot 7,35 \cdot 10^3 + 210,5 \left( \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) \cdot (4,03 \cdot 10^5) \left( \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right)$$

$Q = 9,063 \cdot 10^7$  J/h berotu beharko litzateke.

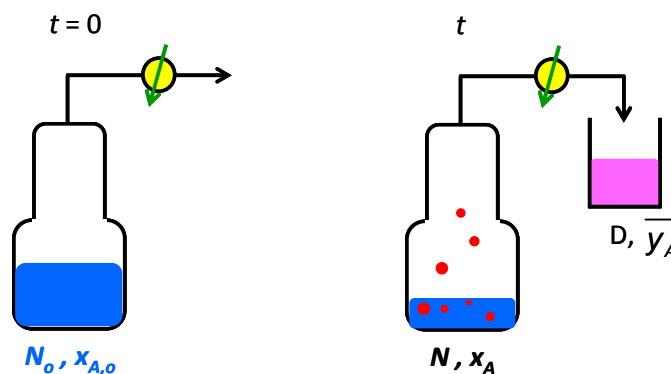
**12.5.4 Destilazio diferentziala**

Batez ere laborategi-eskalan erabiltzen da, lurrunkortasun erlatibo handiko nahasteak bereizteko. Egoera ez-geldikorrean dihardu. Bereizi nahi den nahastea destilazio-ontzian sartzen da eta berotu egiten da. Nahastearen burbuila-tenperaturara heltzean, likidoaren muinean sortzen den lurruna ekipoaren goiko aldetik irteten da; kondentsatu ondoren, likido-eran jasotzen da (**destilatua**), eta ontzian hondar-likidoa geratzen da (**hondarra**). Praktikan, oso zaila da destilazio mota hau zehazki gauzatzea, gora alde egiten duen lurrunaren zati bat (txikia bada ere) kondentsatuta ontzira erortzen baita berriro (errefluxu-maila txiki bat sortzen da). Osagai lurrunkorrenaz aberastuta dagoen lurruna sistematik kanporatzean, ontzian geratzen den nahaste likidoan osagai astunena nagusituz doa. Gainera, destilazioa aurrera doan heinean, nahastearen irakite-tenperatura handitu egiten da (osagai astunenaz aberasten ari baita) eta sortzen diren lurrun-burbuletan osagai lurrunkor gutxiago doa (ikusi 12.11 irudian  $T-x_A-y_A$  diagraman destilazio diferentzialaren eskema).



**12.11. irudia. Destilagailu diferentzialaren eskema eta eragiketaren garapena oreka-diagraman.**

Destilagailu horren diseinua egiteko, masa-balantzea egingo da, egoera ez-geldikorreko sistema dela kontuan hartuz. Denbora-tarte oso labur batean likidotik lurrunera pasatu den osagai lurrunkorrena zenbatzen bada:



**12.12. irudia. Destilagailu diferentzialaren eragiketa.**

Ontzian sartutako Aren molak = Hondarreko Aren molak + Destilatuko Aren molak

$$x_A \cdot dL = (x_A - dx_A) \cdot (L - dL) + y_A \cdot dL \quad (12.21)$$

$dx_A \cdot dL$  baztertzen bada eta  $t = 0$  eta  $t = t$  tarteen artean integratzen bada, Rayleigh-en ekuazioa (12.22) lortzen da. Ekuazio horrekedozein unetan osagai lurrunkorrenaren banaketa nolakoa den adierazten du.

$$\ln\left(\frac{N_0}{N}\right) = \int_{x_A}^{x_{A,0}} \frac{dx_A}{y_A - x_A} \quad (12.22)$$

Rayleigh-en ekuazioaren integrazio analitikoak,  $\alpha_{AB}$  konstantea bada, adierazpen honetara eramaten gaitu:

$$\ln\left(\frac{N_0}{N}\right) = \left(\frac{1}{\alpha_{AB} - 1}\right) \cdot \ln\left(\frac{x_{A,0}}{x_A}\right) + \left(\frac{\alpha_{AB}}{\alpha_{AB} - 1}\right) \cdot \ln\left(\frac{1 - x_A}{1 - x_{A,0}}\right) \quad (12.23)$$

Orekaren erlazio matematikorik ez badago edo integratzea erraza ez bada, Rayleigh-en ekuazioa grafikoki ebazten da.

Ohartu gaitezen ezen, flash destilazioan ez bezala, destilazio mota honetan lurrun-burbuilek, sortu ahala, likidoaren gainazaletik alde egiten dutela. Beraz, lurrunaren konposizioa denboran zehar aldatuz doa (hasieran A osagaien aberatsa den arren, denborarekin B osagaien aberastuz doa). Destilatuaren ontzian konposizio desberdineko lurruna biltzen ari denez, lurrunaren batez besteko konposizioa ematen da, eta arestian aipatutako masa-balantzearekin kalkula daiteke.

$$\bar{y}_A = \frac{N_0 \cdot x_{A,0} - N \cdot x_A}{D} \quad (12.24)$$

Destilazio mota honekin, osagai astunena ezin daiteke aldi berean purutasun handiz eta ugari lortu.

## Adibidea 2.4 adibidea

Moletan % 75 *n*-heptano ( $C_7$ ) eta % 25 *n*-oktano ( $C_8$ ) den nahaste baten 1000 mol bereizi nahi dira destilazio diferentzialez, 101,33 kPa-eko presioan. Kalkula ditzagun (1) *n*-heptanoa molen % 65 izan arte destilatu nahi bada, (1a) destilatuaren eta hondarraren molak (1b) hondarreko heptanoaren mol-frakzioa (1c) destilatu guztia ontzi berean bilduko balitz, destilazioaren batez besteko konposizioa; (2) hondarrean 200 mol geratzen diren arte destilatzen bada (2a), azken unean dagoen hondarraren konposizioa.

### Ebazpena

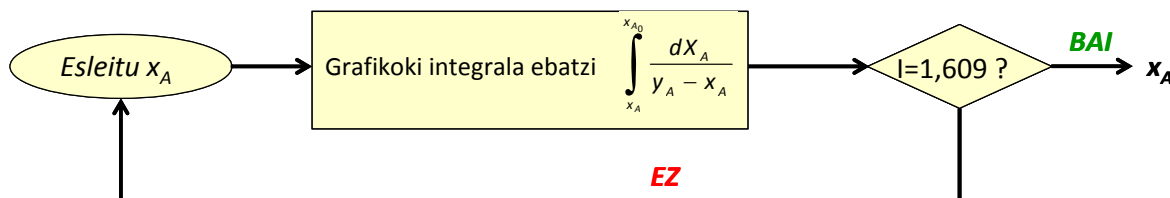
(1) Rayleigh-en ekuazioa grafikoki zein analitikoki ebatz daiteke. Analitikoki ebazteko,  $y_A = f(x_A)$  oreka-erlazioa integralean ordezkatu behar da. 1 adibidean kalkulatu da lanerako presioari dagokion oreka-erlazioa  $y_A = \frac{2,19 \cdot x_A}{1 + 1,19 \cdot x_A}$  dela. Ekuazio hori Rayleigh-en ekuazioan ordezkatu eta integratzen bada, ikusten da  $N = 349,1$  mol dela.

Grafikoki ebazteko lehenik eta behin  $\left(\frac{1}{y_A - x_A}\right)$  vs  $x_A$  grafikoa irudikatu behar da.

Grafiko horretan integralaren goiko (0,60) eta beheko (0,75) mugak kokatuta daudenez, kurbaren azpiko azalera kalkulatu da (grafikoki integratuz, 1,05), eta, ondorioz,  $N = 350$  mol. Beraz, hondarrean  $n$ -heptanoa molen % 60 izateko, 650 mol destilatu behar izan dira.

Destilatuaren batez besteko konposizioa % 83 da  $n$ -heptanoan.

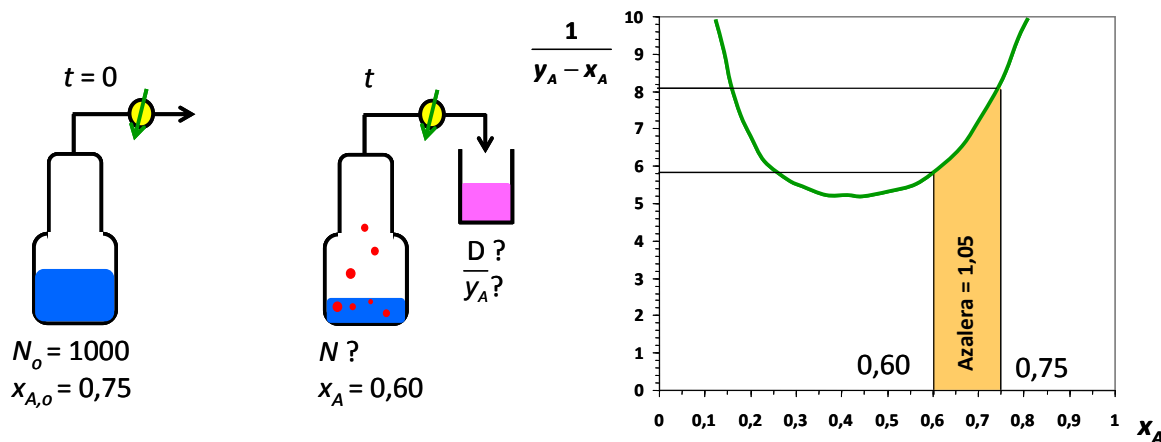
(2) Kasu honetan, integralaren balioa  $\ln(N_0/N) = 1,609$  da. Integralaren goiko muga ( $x_{A,0} = 0,75$ ) ezaguna den arren, beheko muga ( $x_A$ ) ez da ezagutzen. Beraz, haztapen bidez ebatziko da, sekuentzia honi jarraituz:



Taula honetan agertzen da prozesuaren eboluzioa.

Urratsa	$x_A$	Integrala	Errorea (%)
1	0,40	2,139	33,0
2	0,45	1,880	16,8
3	0,50	1,616	0,4
4	0,501	1,609	~0

Beraz, hondarrean, osagai lurrunkorrenaren mol-frakzioa destilazioa eteten den unean 0,501 da.



## 12.6 ERREFLUXU-DESTILAZIO JARRAITUA

Flash destilazioa lurrunkortasun erlatibo handiko nahasteak bereizteko erabiltzen da. Lurrunkortasun erlatiboa bat izatetik gertu badago, errefluxu-destilazioa erabiltzen da osagai lurrunkorrena eta astunena purutasun handiz lortzeko.

Errefluxuarekin lan egitean, **zutabe erretiludunak** erabiltzen dira, nahiz eta dorre beteekin ere lan egin daitekeen. Ekipora elikagaia sartzten da, eta, behin ekipa barruan dagoela, lurrunak behetik gora zirkulatzen du, eta likidoak, berriz, goitik behera. Lurruna osagai lurrunkorrenaz aberastuz doa, likidoa osagai astunenaz aberasten doan heinean.

Zutabearen goiko aldetik irteten den lurrun-emariaren zati bat kondentsatu eta likido-eran zutabera itzultzen da (errefluxua), lurrunaren kontrako norantzan zirkulatuz; masa-transferentzia areagotzen denez, osagai lurrunkorrena nagusitzen da lurrunean. Zutabearen

goialdeari **doitze-eremu** deritzo, eta osagai lurrunkorrena nagusitzen den eremua da (ikusi 12.13 irudia). Goialdetik irteten den korrrontea **destilatua** ( $D$ ) da.

Modu berean, elikadura sartu den eremuan, azpialdean, likidoaren zati bat irakinarazi egiten da, eta berriro ekipora sartzen da; hala, goitik behera datorren likidoarekin kontaktua du kontrakorrontean, masa-transferentzia areagotzeko. Horrela lan eginez, behealdetik irteten den likidoa osagai astunenaz aberasten da. Zutabearen behealdeari **agortze-eremu** deritzo, eta osagai astunena nagusitzen den eremua da (ikusi 12.13 irudia). Behealdetik irteten den korrrontea **hondar-korrontea** da ( $B$ ).

Bereizi nahi den nahastea ideala bada, lurruntzen den mol bakoitzeko mol bat kondentsatzen da (bi konposatuen bero sorrak berdinak badira). Hori hala izanik, doitze-eremuan goitik behera doan likido-emaria ( $L$ ) eta behetik gora doan lurrun-emaria ( $V_d$ ) konstante mantentzen dira. Era berean, agortze-eremuan gauza berbera gertatuko da ( $L_a$  eta  $V_a$  hurrenez hurren).

Destilazioa egiteko zutabe erretiludunak McCabe-Thiele-ren hurbilketa-metodoaz diseinatuko dira. Dorrean bero-galera handiak gertatzen ez badira eta nahaste-beroa baztergarria bada, nahastea bereizteko behar den etapa kopurua kalkulatzeko metodo egokia da; bestela, entalpiak erabiltzen dituen Ponchon-Savarit-en metodoa erabili beharko litzateke.

McCabe-Thiele-ren hurbilketa-metodoan,  $y_A-x_A$  oreka-diagrama erabiltzen da elikadura jakin batekin bereizte-maila finkoa lortzeko, horretarako beharrezkoa den etapa kopurua (erretilu kopurua) kalkulatzeko. Metodo hori erabiltzeko nahitaezkoa da datu hauek jakitea:

- elikaduraren kondizioak eta emaria ( $F$ ,  $T_F$  eta  $x_{F,A}$ ).
- destilatuaren eta hondar-likidoaren konposizioak.
- errefluxu-erlazioa.

Zutabe horien barruan erretiluak daude, eta erretilu bakoitzetik likidoa eta lurruna orekan irteten dira, baldin eta eragiketa ideala bada. Goialdetik irteten den lurruna guztiz kondentsatzen da (kondentsagailu osoa), eta behetik irteten den likido zatiki bat berriro lurruntzen da (lurrungailu partziala).

Demagun 12.13 irudiko errefluxu-destilagailu jarraitua dugula. Bereizi nahi den nahastea elikatzen da ( $F$ , mol/t), eta korronte horretan osagai lurrunkorrenaren mol-frakzioa  $x_{F,A}$  da. Destilatuaren emari osoa eta destilatuaren osagai lurrunkorrenaren mol-frakzioa  $D$  (mol/t) eta  $x_{D,A}$  dira, hurrenez hurren. Hondar-korrontearen emari osoa  $B$  (mol/t) da, eta, han osagai astunenaren mol-frakzioa  $x_{B,A}$  da. Errefluxu-korrontearen emaria  $L$  (mol/t) da, eta konposizioa,  $x_{D,A}$ .

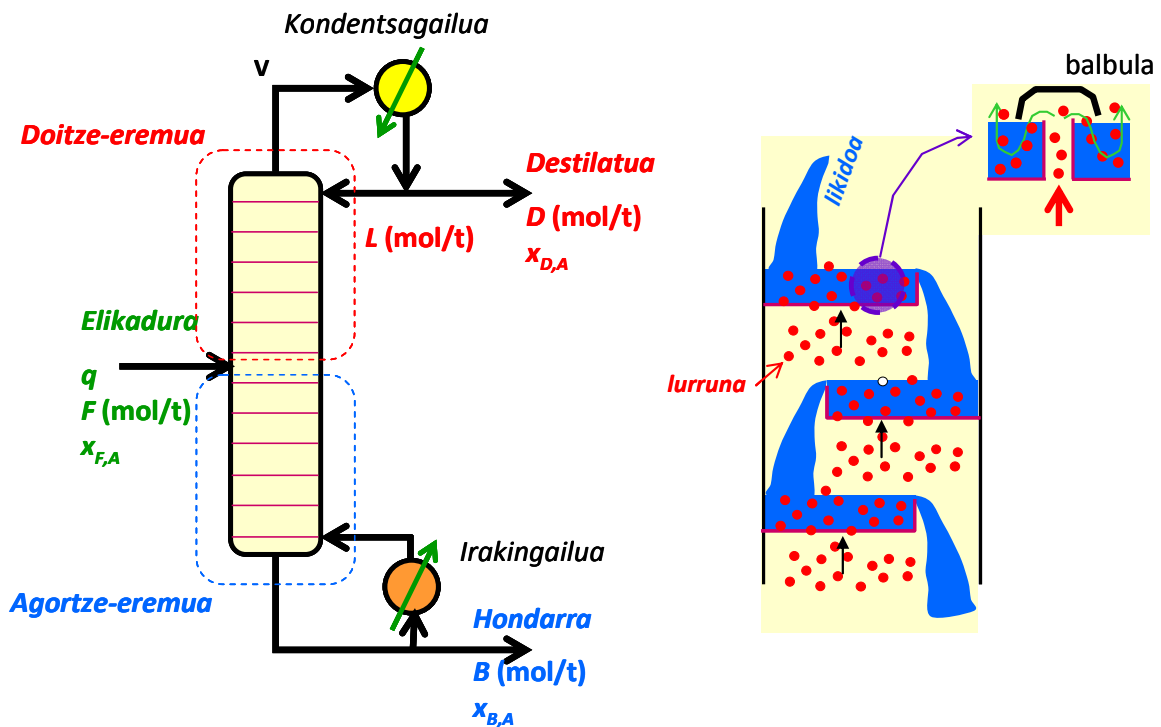
Destilatuaren eta hondar-likidoaren emariak zutabe osoari egindako masa-balantzeetatik lor daitezke (mol/t eran):

$$\text{Sistema osoa (mol/t)} \quad F = D + B \quad (12.25)$$

$$\text{A osagaia (mol/t)} \quad F \cdot x_{F,A} = D \cdot x_{D,A} + B \cdot x_{B,A} \quad (12.26)$$

Kondentsagailuan masa-balantzea egitean:

$$V_d = D + L \quad (12.27)$$



**12.13 irudia. Errefluxu-destilazio jarraitua dorre erretiludunearan (ezkerrean) eta likido eta lurrunaren kontaktuaren xehetasuna (eskuinean).**

Errefluxu-erlazioa ( $R$ ) da zutabera likido-eran itzultzen den korrontearen eta destilatu gisa kanporatzen den emariaren arteko erlazioa:

$$R = \frac{L}{D} \tag{12.28}$$

**12.6.1 Doitze-eremuko eragiketa-lerroa**

12.14 irudian marra ez-jarraituez inguratu den sisteman masa-balantzeak eginez (mol/t):

Sistema osoa:  $V_d = D + L \tag{12.29}$

A osagaia:  $V_d \cdot y_{n,A} = D \cdot x_{D,A} + L \cdot x_{A,n+1} \tag{12.30}$

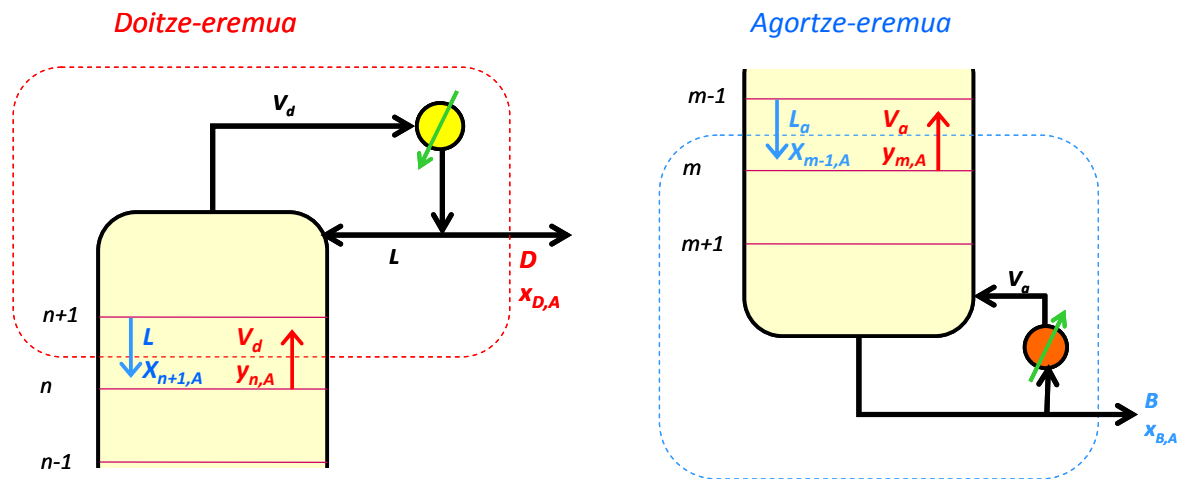
Eta, hortik:

$$y_{n,A} = \frac{L}{V_d} \cdot x_{n+1,A} + \frac{D \cdot x_{D,A}}{V_d} \tag{12.31}$$

Errefluxu-erlazioa erabiltzen bada, **doitze-eremuko eragiketa-lerroa (DEL)** lortzen da:

$$y_{n,A} = \frac{R}{R+1} \cdot x_{n+1,A} + \frac{x_{D,A}}{R+1} \tag{12.32}$$

Doitze-eremuan behetik gora doan lurruneke eta goitik behera doan likidoko A osagaiaren konposizioak erlazionatzen ditu **DEL** lerroak. Doitze-eremuko osagai lurrunkorrarenaren masa-balantzea da ekuazio hori.  $y_A$  vs.  $x_A$  oreka-diagraman,  $R/(R+1)$  maldako lerro zuzena da, eta jatorrian ordenatuak  $x_{D,A}/(R+1)$  balio du (12.17 irudia). Gainera,  $x_{n+1,A} = x_{A,D}$  denean,  $y_{n,A} = x_{D,A}$  da, hau da, **DEL**a diagonalean dagoen  $D$  puntutik pasatzen da ( $x_{D,A}$ ,  $x_{D,A}$  koordenatuak dauzka).



12.14 irudia. Doitze- eta agortze-eremuak.

### 12.6.2 Agortze-eremuko eragiketa-lerroa

12.14 irudian marra ez-jarraituez inguratuta agertzen den agortze-eremuko masa-balantzeak eginez (mol/t):

$$\text{Sistema osoa:} \quad L_a = V_a + B \quad (12.33)$$

$$\text{A osagaia:} \quad L_a \cdot x_{m-1,A} = V_a \cdot y_{m,A} + B \cdot x_{B,A} \quad (12.34)$$

Hortik, **agortze-eremuko eragiketa-lerroa (AEL)** lortzen da:

$$y_{m,A} = \frac{L_a}{V_a} \cdot x_{m-1,A} - \frac{B \cdot x_{B,A}}{V_a} \quad (12.35)$$

Ekuazio hori agortze-eremuko osagai lurrunkorrenaren masa-balantzea da. Haren malda agortze-eremuko  $L_a/V_a$  da, eta jatorrian daukan ordenatua  $\left(-\frac{B \cdot x_{B,A}}{V_a}\right)$  da (12.17 irudia).

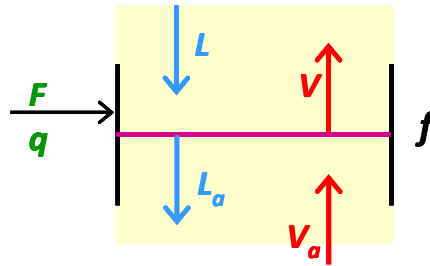
Agortze-eremuan behetik gora doan lurruneko eta goitik behera doan likidoko A osagaiaren konposizioak erlazionatzen ditu AEL lerroak. Gainera,  $x_{m-1,A} = x_{B,A}$  denean,  $y_{m,A} = x_{B,A}$  da, hau da, AELa diagonalean dagoen eta  $(x_{B,A}, x_{B,A})$  koordinatuak dauzkan B puntutik pasatzen da.

### 12.6.3 Elikaduraren lerroa

Doitze- eta agortze-eremuetako  $L$  eta  $L_a$  likido-korronteen arteko erlazioa lortzeko, elikadura zein egoeratan sartzen den aztertu behar da. Horretarako, elikaduraren  $f$  erretiluaren entalpia-balantzea egin behar da. Sinplifikatuz,  $q = \frac{L_a - L}{F}$  deitzen bada (elikatzen den mol bakoitzeko lurruntzen diren molak), **elikadura-eremuko eragiketa-lerroa (EEL) edo q lerroa** lortzen da:

$$y_{f,A} = \frac{q}{q-1} \cdot x_{f,A} - \frac{x_{F,A}}{q-1} \quad (12.36)$$



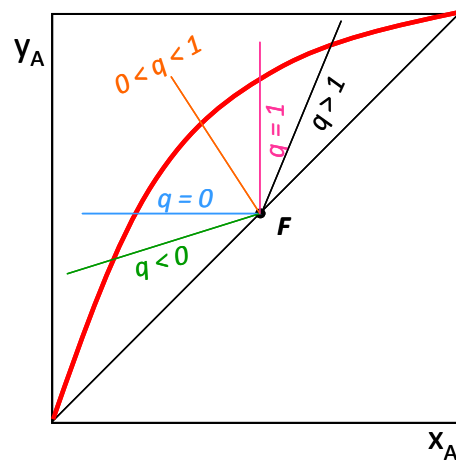


12.15 irudia. Elikadura-eremua.

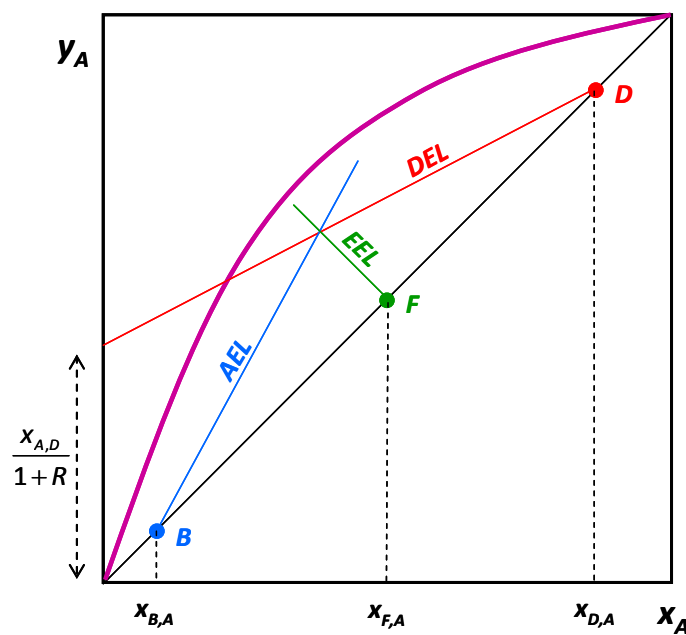
Ekuazio hori ( $x_{A,F}$ ,  $x_{A,F}$ ) koordinatuak dauzkan F puntutik pasatzen da, eta  $\left(\frac{q}{1-q}\right)$  malda du.

Elikaduraren zenbait egoera kontuan hartuta EEL lerro hauek izan daitezke:

Egoera	$q$
Lurrun gainberotua	$< 0$
Lurrun ase	$= 0$
Likidoa + lurruna	$0 < q < 1$
Likido ase	$= 1$
Likido azpihoztua	$> 1$



12.16 irudia. Elikadura-eremuko eragiketa-lerroa elikaduraren hainbat egoeratarako.

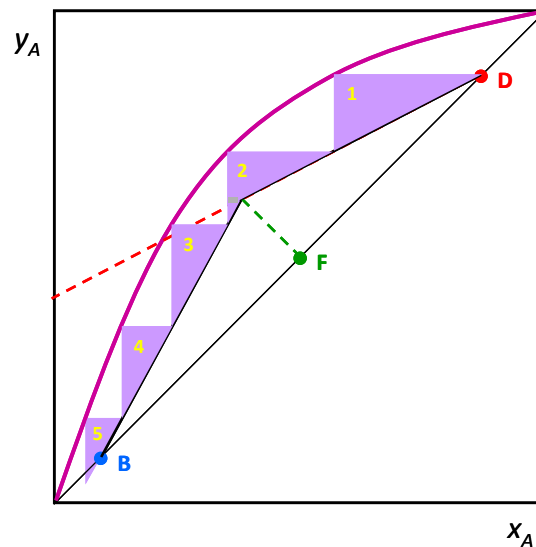


12.17 irudia. DEL, AEL eta EEL lerroen irudikapena.

12.17 irudiari erreparatuz, *DEL* lerro finko batentzat *EEL* elikadura-lerroa aldatzen bada, *AEL* lerroa ere aldatu egiten da. Errefluxu-erlazioaren aldaketak *DEL* eta *AEL* lerroen malden aldaketa dakar, eta, horren ondorioz, prozesuan behar den etapa kopurua ere aldatu egingo da, 12.6.5 atalean ikusiko den bezala.

#### 12.6.4 Etapa ideala edo erretilu kopuruaren kalkulua

Behin *DELa*, *EELa* eta *AELa* irudikatuta, destilazioa egiteko zenbat etapa ideal behar diren (hau da, zenbat erretilu) kalkulatzeko da grafikoki. *D* puntutik abiatuz, lerro horizontala marraztu behar da orekarekin elkartu arte, eta hortik lerro bertikala marraztu behar da *DEL* edo *AEL* lerroa ebaki arte. Horrelako maila bakoitza etapa teoriko bat da. Prozedura horri jarraitzen zaio *B* puntura heldu arte, eta marrazten diren maila guztien baturak ekipoak behar dituen erretilu kopurua ematen du. 12.18 irudian azaltzen den adibidean, 5 etapa (erretilu) beharko lirateke.

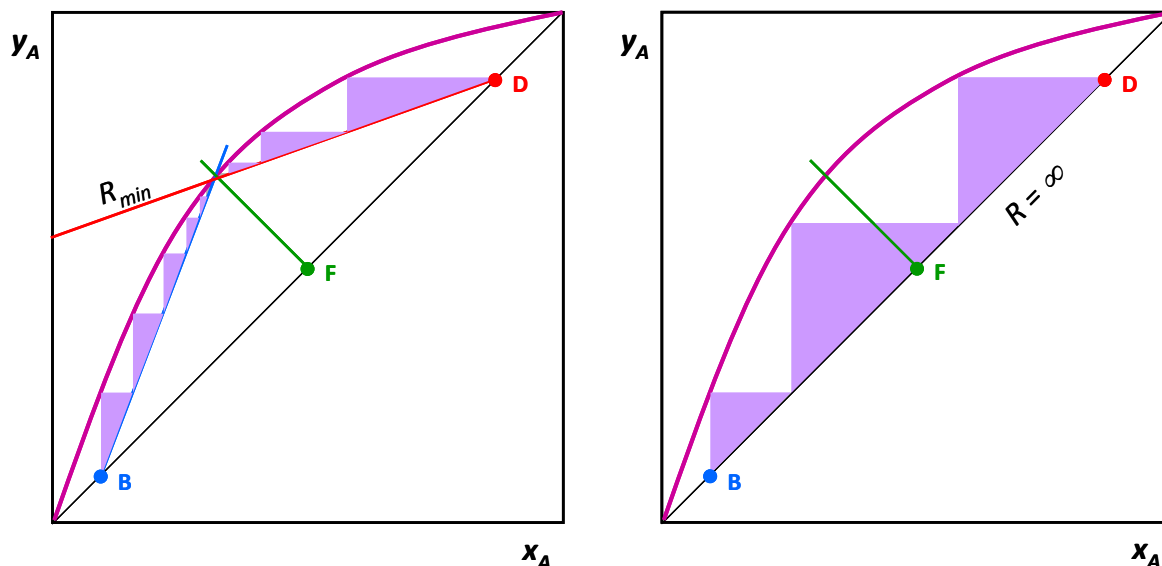


**12.18 irudia. McCabe-Thieleren metodo grafikoa errefluxu-destilazio jarraitua egiteko zenbat etapa ideal behar diren kalkulatzeko.**

#### 12.6.5. Errefluxu-erlazioaren eragina

*DEL* lerroa errefluxu-erlazioaren (*R*) arabera denez, bereizte-maila finko bat lortzeko behar den etapa kopurua ere *R*-ren arabera da. Errefluxu-erlazioa handitzen den heinean, *DEL* lerroa diagonaletik gertuago dago;  $R = \infty$  denean (destilagailutik ez da produkturik ateratzen, burutik irteten den guztia zutabera itzultzen da), *DELa* diagonalarekin bat dator, *AELarekin* batera (ikusi 12.19 eskuineko irudia). Hala, bereizte-maila finkoa lortzeko etapa gutxiago behar da, eta  $R = \infty$  denean etapa kopurua minimoa da ( $N_{min}$ ). Horrela lan egitean, ekipoaren kostua minimoa izango litzateke (erretilu gutxien behar baitu horrela), baina eragiketa-kostuak infinituak izango lirateke (ikusi 12.20 irudia). Tarte osoan nahastearen lurrunkortasun erlatiboa konstante mantentzen bada, Fenske-ren ekuazioak ematen du etapa kopuru minimoa, grafikoki ere kalkulatzeko aukera izan arren:

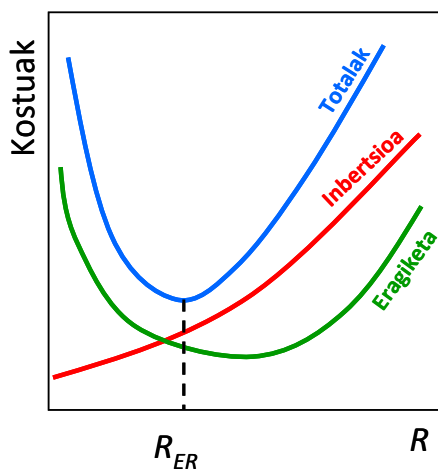
$$N_{min} = \frac{\log \left[ \left( \frac{x_{D,A}}{1-x_{D,A}} \right) \left( \frac{1-x_{B,A}}{x_{B,A}} \right) \right]}{\log \alpha_{AB}} - 1 \quad (12.37)$$



12.19 irudia. DEL eta AEL lerroen irudikapena errefluxu-erlazioa minimoa (ezkerrean) eta infinitua (eskuinean) denean.

$R$  txikiagoa den neurrian, DEL lerroaren malda txikitu egiten da eta jatorrian daukan ordenatuaren balioa  $\left(\frac{x_{D,A}}{1+R}\right)$  handitzen da. Hala, DEL lerroak, elikaduraren EEL lerroak eta oreka-lerroak bat egiten duten puntuak  $R$ -ren balio minimoa ematen du ( $R_{min}$ ); hori baino balio txikiagoa erabiliko balitz, DEL eta EEL lerroek oreka zeharkatu ondoren elkar ebakiko lukete, eta hori ezinezkoa da.  $R_{min}$  errefluxu-erlazio minimoarekin lan egitean, infinitu etapa behar dira; izan ere, masa-transferentzia emateko indar-eragilea zero egiten da hiru lerroen ebaki-puntuak. Horregatik, era horretan lan eginez gero eragiketa-kostuak minimoak izango lirateke, baina ekipoaren kostua infinitua izango litzateke (ikusi 12.20 irudia).

Eragiketetan, errefluxu-erlazioaren balio optimoa ( $R_{min} < R_{er} < \infty$ ) ikuspegi ekonomikoa kontuan hartuta kalkulatzen da. Zutabearen goialdeko lurruna kondentsatzeko erabiltzen den kondentsagailua eta behealdeko likidoa irakinarazteko erabiltzen den irakingailua osoak badira, ez dute bereizterik eragiten eta ez dira etapatzat hartzen. Baina partzialak izango balira, bereiztea eragingo lukete, eta bakoitza etapa gehigarri gisa kontsideratu beharko litzateke.



12.20 irudia. Kostuen aldaketa errefluxu-erlazioaren arabera.

### Adibidea 12.5 adibidea

101,33 kPa-ean, *n*-heptanoz (A) eta *n*-oktanoz (B) osatutako nahaste baten 1000 mol/h ( $x_{F,A} = 0,5$ ) bereizi nahi dira errefluxu-destilazioz, destilatuan molen % 90 *n*-heptanoa eta hondarlikidoan molen % 10 *n*-heptanoa izateko. Elikadura-likidoa asea bada, kondentsagailu osoa erabiltzen bada eta irakingailua partziala bada, kalkula ditzagun (a) erabil daitekeen errefluxu-erlazio minimoa; (b) minimoa baino % 50 gehiago erabiltzen bada, zenbat erretilu beharko diren; (c)  $R = \infty$  bada, bereizi ahal izateko, zenbat etapa behar diren.

#### Ebazpena

(a) Prozedura honi jarraitu zaio:

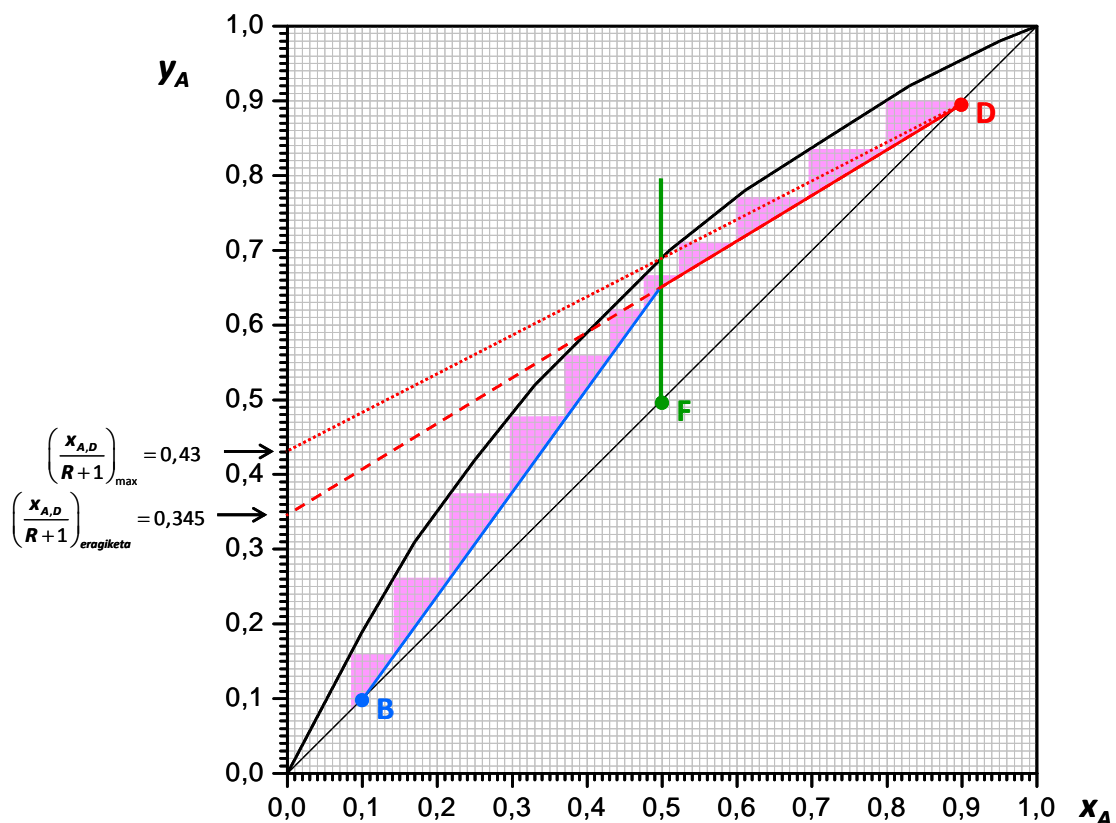
(1) oreka-datuekin, 101,33 kPa-eko presioari dagokion  $y_A$ - $x_A$  oreka-diagrama marraztu da.

(2) zutabe osoaren masa-balantzetik:

$$\text{Sistema osoa:} \quad 1000 = D + B$$

$$\text{n-heptanoa:} \quad 1000 \cdot 0,5 = D \cdot 0,90 + B \cdot 0,10$$

Horren ondorioz,  $D = 500$  mol/h eta  $B = 500$  mol/h dira.



(3)  $F$ ,  $B$  eta  $D$  puntuak kokatu dira diagraman.

(4) elikaduraren  $q$  lerroa edo  $EEL$ a marrazten dira:  $q = 1$ enez (likido asea delako),  $F$  puntutik irteten da lerro bertikala.

(5)  $R_{\min}$  kalkulatzeko da. Irudian,  $DEL$ ak,  $EEL$ ak eta orekak bat egiten duten puntuari dagokion  $DEL$  maldak edo jatorriko ordenatuak ematen du balioa:

Jatorrian daukan ordenatua  $\left(\frac{x_{D,A}}{R+1}\right)_{\max} = 0,43$  bada,  $R_{\min} = 1,093$  da.

(b) (6) Eragiketarako errefluxu-erlazioari dagokion  $DEL$ a marrazten da:  $R_{er} = 1,64$ .

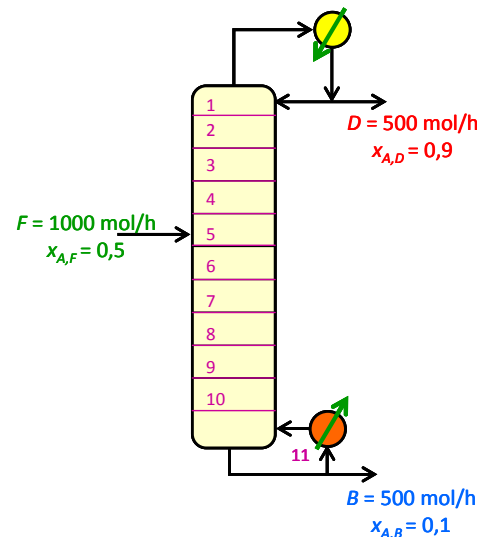
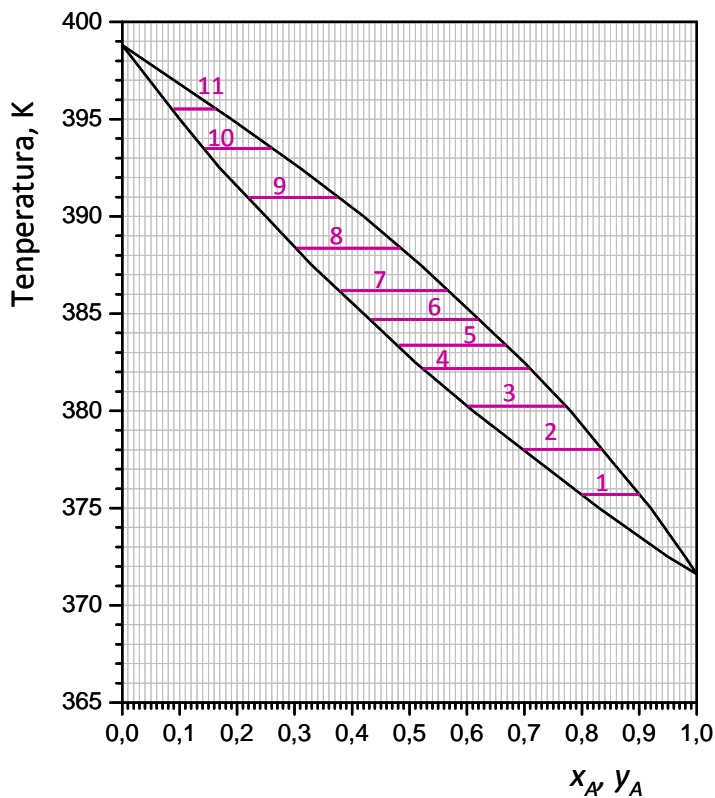
Jatorrian daukan ordenatua  $\left(\frac{x_{D,A}}{R+1}\right)_{er} = 0,345$  da.

(7)  $EEL$ a eta  $DEL$ a marraztuta izanik,  $AEL$ a marrazten da.

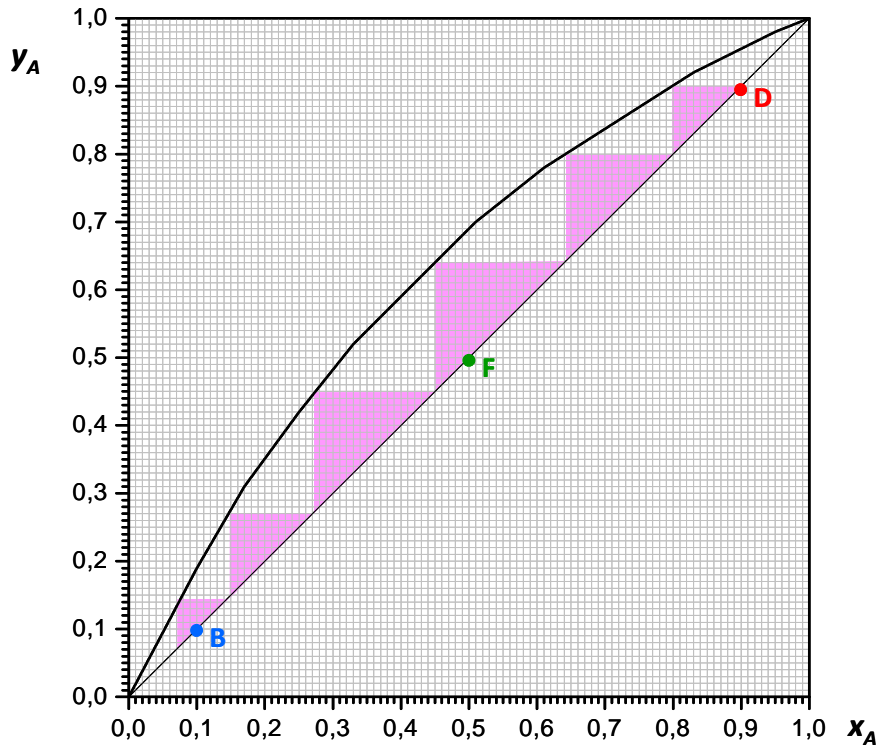
(8)  $Dtik$  Bra heltzeko mailak marrazten dira,  $DEL$ a eta  $AEL$ a eta oreka-lerroa erabiliz.

Elikadura 5. erretiluan sartuko litzateke, eta, irakingailua partziala denez, guztira behar diren 11 etapetatik 10 erretilu izango liriateke, 11. etapa irakingailu baita.

Ondoko irudian agertzen da ekipo honen barne-egitura eta erretilu bakoitzean lortzen den bereizte-maila, eta  $y_A$  eta  $x_A$  balioak agertzen dira.



(c) Errefluxu-erlazioa infinitua denean  $DEL$ a eta  $AEL$ a diagonalean daude. Irudiaren arabera, 6 etapa ideal beharko liriateke, gutxienez, bereizte-maila lortzeko.

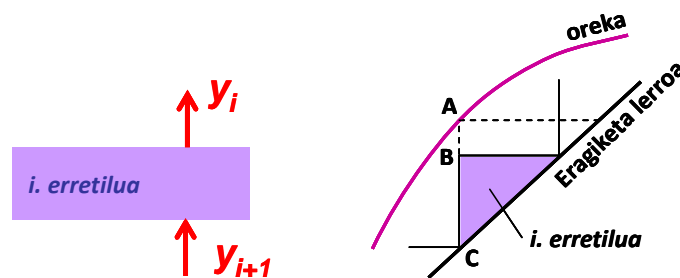


### 12.7 ERRETILUEN ERAGINKORTASUNA

Orain arteko azalpenetan, erretilu bakoitzean oreka lortu dela hartu da. Hala ere, benetako eragiketak burutzen direnean hori ez da betetzen, erretiluen funtzionamendua ez delako ideala —faseen arteko ukipena egokia ez delako edo faseen arrastea eman daitekeelako—. Horregatik, etapa bakoitzean ez da orekarik lortzen eta eragiketa egin ahal izateko behar den etapa kantitatea, idealki lan egiten denean kalkulaturakoa baino handiagoa da. Erretiluen eraginkortasuna horrela definitzen da (gas fasearentzako) (12.21 irudian oinarrituta):

$$E = \frac{y_{i+1} - y_i}{y_{i+1} - y_i^*} \tag{12.38}$$

Eraginkortasuna, erretiluan lortzen den konposizio aldaketa ( $y_{i+1} - y_i$ ) eta oreka lortu izan balu izango zukeen konposizio aldaketaren ( $y_{i+1} - y_i^*$ ) arteko erlazioa da, 12.21 irudian  $\frac{BC}{AC}$  luzeren erlazioa, alegia.



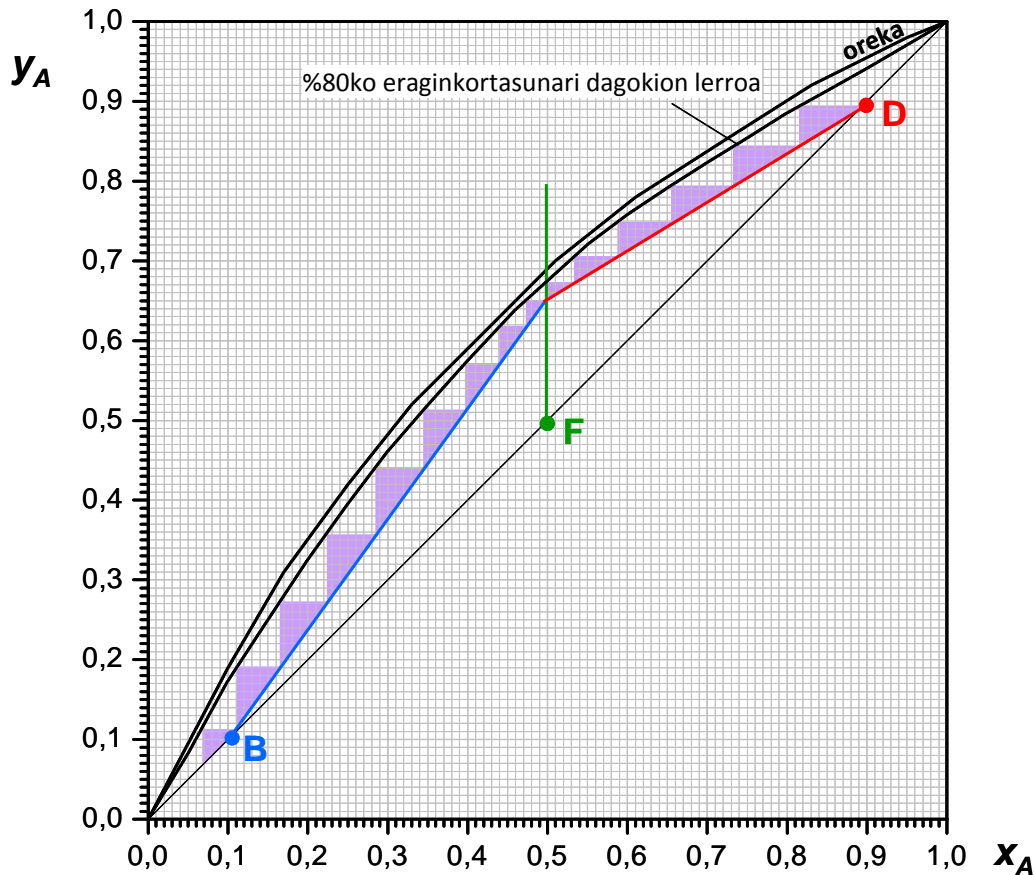
12.21 irudia. Erretiluaren eraginkortasuna gas fasearentzako. Marra ez-jarraitua etapa idealari dagokio.

## Adibidea 12.6 adibidea

Erretiluen eraginkortasuna %80koa bada, kalkulatu dezagun  $R_{er} = 1,64$  denerako zenbat erretilu beharko diren 12.5 adibideko destilazio eragiketa burutzeko.

### Ebazpena

Erretiluen eraginkortasuna %80koa bada, oreka lerroaren azpialdean benetan lortzen den lerroa marraztuko da (oreka lerroa eta zutabeko eremu bakoitzeko eragiketa lerroaren artean, 12.21 irudian agertzen den moduan).



Eragiketarako 15 erretilu behar dira.

## 12.8 BURBUILA- ETA IHINTZ-TENPERATUREN KALKULUA

Nahaste baten burbuila-tenperatura irakiten hasten deneko tenperatura da. Osagai bakoitzeko  $y_i = K_i \cdot x_i$  erako ekuazio bat egongo da,

$$K_i = \frac{P_i^0}{P} \quad (12.39)$$

izanik.

Ekuazio horrek adierazten du  $i$  osagaia likidoan eta lurrunean nola banatzen den. Raoult-en legea eta Dalton-en legea betetzen badute, adierazpen hauek lortzen dira:

$$\left. \begin{aligned} P \cdot y_i &= P_i^0 \cdot x_i \\ y_i &= \frac{P_i^0 \cdot x_i}{P} = K_i \cdot x_i \\ x_i &= \frac{P \cdot y_i}{P_i^0} \end{aligned} \right\} \quad (12.40)$$

### 12.7.1 Burbuila-tenperaturaren kalkulua

Nahastean C osagai badaude, guztien mol-frakzioen batuketaren emaitzak bat izan behar du:

$$1 = \sum_{i=1}^C K_i \cdot x_i \quad (12.41)$$

$K_i$  aldagaia tenperaturaren funtzioa denez, tenperatura bakarrak —nahastearen burbuila-tenperaturak, alegia— beteko du goiko baldintza. Sistema haztatuz ebazten da.

### 12.7.2 Burbuila-tenperaturaren kalkulua

Nahastean C osagai badaude, guztien mol-frakzioen baturak bateko emaitza eman behar du:

$$1 = \sum_{i=1}^C \frac{y_i}{K_i} \quad (12.42)$$

$K_i$  aldagaia tenperaturaren funtzioa denez, tenperatura bakarrak —nahastearen ihintz-tenperaturak, alegia— beteko du goiko baldintza. Sistema haztatuz ebatziko da.

## Adibidea 12.6 adibidea

(a)  $n$ -heptanoz (1) eta  $n$ -oktanoz (2) osatutako nahaste bitar likidoan  $x_1 = 0,65$  eta  $x_2 = 0,35$  badira, kalkula dezagun sistemak zer burbuila-tenperatura duen 101,33 kN/m<sup>2</sup>-ko presioan ;  
 (b) 101,33 kN/m<sup>2</sup>-ko presioan,  $y_1 = 0,65$  eta  $y_2 = 0,35$  izango badira, nahastearen ihintz-tenperatura.

### Ebazpena

Hauek dira 1 eta 2 osagaien Antoine-ren ekuazioak:

$$\left. \begin{aligned} \ln P_1^0 &= 13,9008 - \frac{2932,72}{T - 55,6356} \\ \ln P_2^0 &= 14,2368 - \frac{3304,16}{T - 55,2278} \end{aligned} \right\}$$

(a) Burbuila-tenperatura: Burbuila-tenperaturan:

$$f(T) = \frac{x_1}{101,33} \cdot \exp\left(13,9008 - \frac{2932,72}{T - 55,6356}\right) + \frac{x_2}{101,33} \cdot \exp\left(14,2368 - \frac{3304,16}{T - 55,2278}\right) - 1 = 0$$

T (K)	$K_1$	$y_1$	$K_2$	$y_2$	$f(T)$
390	1,668	1,084	0,778	0,272	-0,3561
395	1,898	1,233	0,899	0,315	-0,5482
385	1,460	0,949	0,670	0,234	-0,1832
380	1,272	0,827	0,574	0,201	-0,0280
379,05	1,239	0,805	0,557	0,195	-0,0004



Beraz, nahaste likido honen burbuila-tenperatura 379,05 K da, eta sortzen den lehen lurrun-burbuilaren konposizioa  $y_1 = 0,805$  eta  $y_2 = 0,195$  da.

(b) Ihantz-tenperatura: Ihantz-tenperaturan:

$$f(T) = \frac{y_1 \cdot 101,33}{\exp\left(13,9008 - \frac{2932,72}{T - 55,6356}\right)} + \frac{x_2 \cdot 101,33}{\exp\left(14,2368 - \frac{3304,16}{T - 55,2278}\right)} - 1 = 0$$

$T$ (K)	$1/K_1$	$x_1$	$1/K_2$	$x_2$	$f(T)$
390	0,5997	0,38978	1,2859	0,450	0,160
395	0,5270	0,34253	1,1121	0,389	0,268
385	0,6851	0,44529	1,4935	0,523	0,032
387,5	0,6406	0,41640	1,3850	0,485	0,099
383,86	0,7066	0,45930	1,5464	0,541	-0,001

Beraz, nahaste likido honen ihantz-tenperatura 383,86 K da, eta azken likido tantaren konposizioa  $x_1 = 0,459$  eta  $x_2 = 0,541$  da.