

2.1 Kriogén levegőszétválasztás

A nitrogén, oxigén és a nemesgázok ipari előállításának gyakorlatilag kizárólagos nyersanyaga az atmoszferikus levegő. Kivételt képez a hélium, amelyet gazdaságosan az átlagosnál nagyobb hélium-tartalmú földgázokból állítanak elő. Nem tekinthetjük viszont kivételnek az oxigént, amely általában csak melléktermékként keletkezik a vízelektrolízis során a hidrogén főtermék mellett, valamint az argont, amelyet az ammóniaszintézis „lefűjt” gázából ugyan főtermékként állítanak elő, de közvetve ekkor is a levegőből származik.

A száraz és tiszta levegő átlagos összetétele a földfelszín közelében a levegőszennyezőktől eltekintve a következő:

Komponens	Kémiai képlet	Koncentráció, %(V/V)
Nitrogén	N ₂	78,08
Oxigén	O ₂	20,95
Argon	Ar	0,93
Szén-dioxid	CO ₂	0,035
Neon	Ne	$18,18 \cdot 10^{-4}$
Hélium	He	$5,239 \cdot 10^{-4}$
Kripton	Kr	$1,139 \cdot 10^{-4}$
Hidrogén	H ₂	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Xenon	Xe	$8,7 \cdot 10^{-6}$
Radon	Rn	$6 \cdot 10^{-18}$

Gyakorlatilag állandó alkotórésznek tekinthetjük ezenkívül a levegőszennyezők közül a metánt (CH₄) és a dinitrogén-oxidot (N₂O), mintegy $1,5 \cdot 10^{-4}\%$ (V/V) és $0,3 \cdot 10^{-4}\%$ (V/V) közepes koncentrációval.

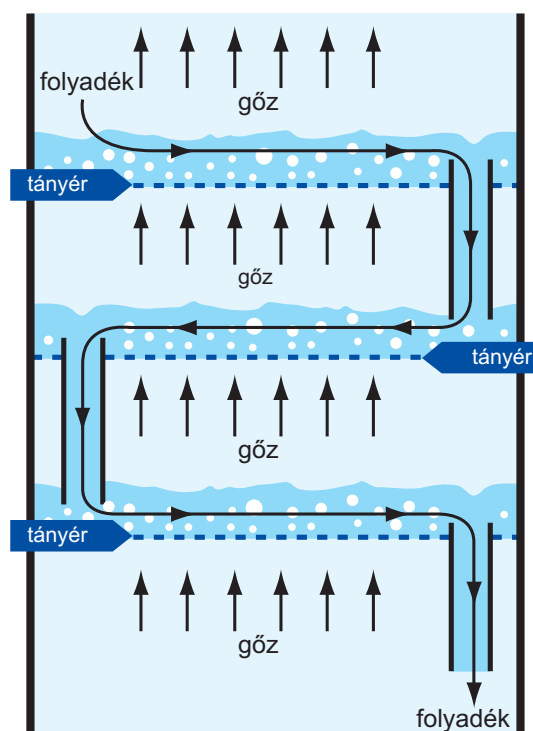
A kriogén levegőszétválasztás azon alapul, hogy a nitrogén, oxigén, valamint az argon és a többi nemesgázok forráspontja – és ennek folytán cseppfolyós állapotban illékonyasága – kisebb-nagyobb mértékben eltér egymástól, így a cseppfolyós levegő rektifikálásával, azaz folyamatos desztillációjával (egyidejű többszöri elgőzölögtetéssel és kondenzáltatással) egymástól elkülönítve előállíthatók.

A rektifikáló oszlop egymás feletti „tányérok” áll, amelyeken a felfelé áramló gőz bensőségesen érintkezik a lefelé folyó folyadékkal, és így közöttük a gőz–folyadék egyensúly (lásd az 1. fejezet: „Gázok cseppfolyós állapotban” című részét) kialakul. A 2.1 ábrán a szitatányéros szétválasztó oszlop egy részének sematikus rajza látható.

Ha leegyszerűsítve, a levegőt nitrogén és oxigén kétkomponensű elegynek tekintjük, a gőz–folyadék egyensúlyt az oxigén–nitrogén elegy úgynevezett *T–x diagramján* ábrázolhatjuk (2.2 ábra, lásd még a 1. fejezetet).

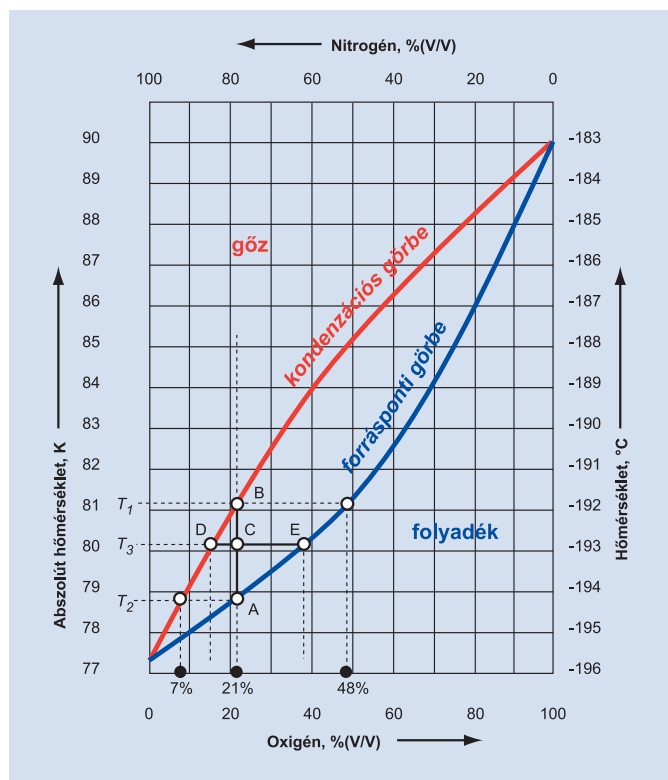


2.1 ábra Rektifikáló oszlop részlete





2.2 ábra Oxigén–nitrogén T - x diagram atmoszferikus nyomáson



Egy bizonyos tányéron T_2 hőmérsékletű folyadék („A” pont) és T_1 hőmérsékletű gőz („B” pont) találkozik össze, melyek összetétele (O_2 -koncentrációja) azonos. A tányéron a hőmérséklet-különbség kiegyenlítődik, és beáll az egyensúly. Az egyensúlyi T_3 hőmérsékleten a folyadék-összetételt az „E” pont, a gőz-összetételt pedig a „D” pont képviseli. Ez azt jelenti, hogy a lecsurgó folyadékban az oxigén, a felszálló gőzben pedig a nitrogén dúsul fel. Ez minden következő tányéron megismétlődik, így megfelelő tányérszám esetén alul tiszta oxigént, felül pedig tiszta nitrogént kaphatunk. A gyakorlatban ez csak a két-oszlopos rendszerrel oldható meg, ahol az alsó és felső oszlop nyomása úgy van megválasztva, hogy a közöttük lévő kondenzátorban az alsó oszlop tetején a felszálló nitrogén forralja a felső oszlop alján összegyűlő cseppfolyós oxigént, miközben ő

maga lekondenzál, cseppfolyós nitrogént képezve (lásd még a magyarázatot az 1. fejezet: „Gázok cseppfolyós állapotban” című részében).

A diagramból még látható, hogy a 21%(V/V) oxigént tartalmazó folyadékkal – amely nagy vonalakban a levegő-összetételt képviseli – 7%(V/V) oxigén tartalmú gőz tart egyensúlyt, míg az ugyanilyen összetételű gőz-eleggyel 48%(V/V) oxigént tartalmazó folyadékelegy van egyensúlyban. A „szivargörbe” alakja függ a nyomástól, ezért az ábránkon bemutatott atmoszferikus koncentrációviszonyoktól a valódi arányok némileg eltérnek. A nyomás növelésével a forrásponti és kondenzációs görbe közeledik egymáshoz, így az egyensúlyi folyadék- és gőz-összetétel közötti különbség csökken.

A többi levegő-alkotórész sorsát a rektifikáló oszlopban, táblázatunkban megadott forráspontjuk határozza meg.

Levegőből előállítható gázok forráspontja atmoszferikus nyomáson:

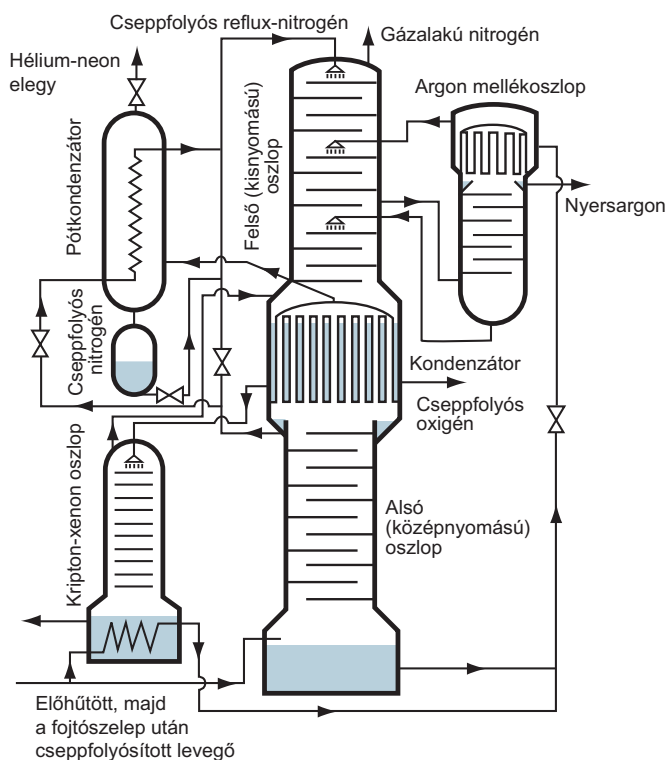
Levegőkomponens	Forráspont, °C
Hélium, He	–268,93
Neon, Ne	–246,05
Nitrogén, N₂	–195,80
Argon, Ar	–185,86
Oxigén, O₂	–182,97
Krypton, Kr	–153,35
Xenon, Xe	–108,10

Mivel az argon forráspontja az oxigéné és a nitrogéné között van, az oxigénéhez közelebb, a felső oszlopnak közelítőleg az alsó harmadán dúsul fel, ahonnan kivezetve, további mellék-oszlopokkal az oxigéntől és nitrogéntől elválasztható.

A krypton és xenon forráspontja jóval magasabb az oxigénénél, ezért a cseppfolyós oxigénben dúsulnak fel a felső oszlop alján, így további rektifikáló fokozatokkal a cseppfolyós oxigénből állíthatók elő, illetve választathatók szét egymástól.

A hélium és neon, mivel forráspontjuk a nitrogénénél is jóval alacsonyabb, az alsó oszlop tetején, az úgynevezett kondenzátorsapkában gázpárnát képezve dúsulnak fel. További dúsításuk, és hélium–neon elegyként való előállításuk az őket hígító nitrogén kondenzáltatásával történhet, a tiszta neont pedig úgy állítják elő, hogy az elegyből a neont cseppfolyósítják (például

2.3 ábra Nitrogén, oxigén és nemesgázok előállítása kriogén levegőtérválasztással



cseppfolyós hidrogénnel való hűtéssel), miközben a hélium, mint legalacsonyabb forráspontú gáz, gázállapotban marad.

Az összes „levegő-gáz” kinyerésének elvét – a gyakorlatban így együtt működve többnyire nem megvalósuló – folyamatábránk (2.3 ábra) szemlélteti.

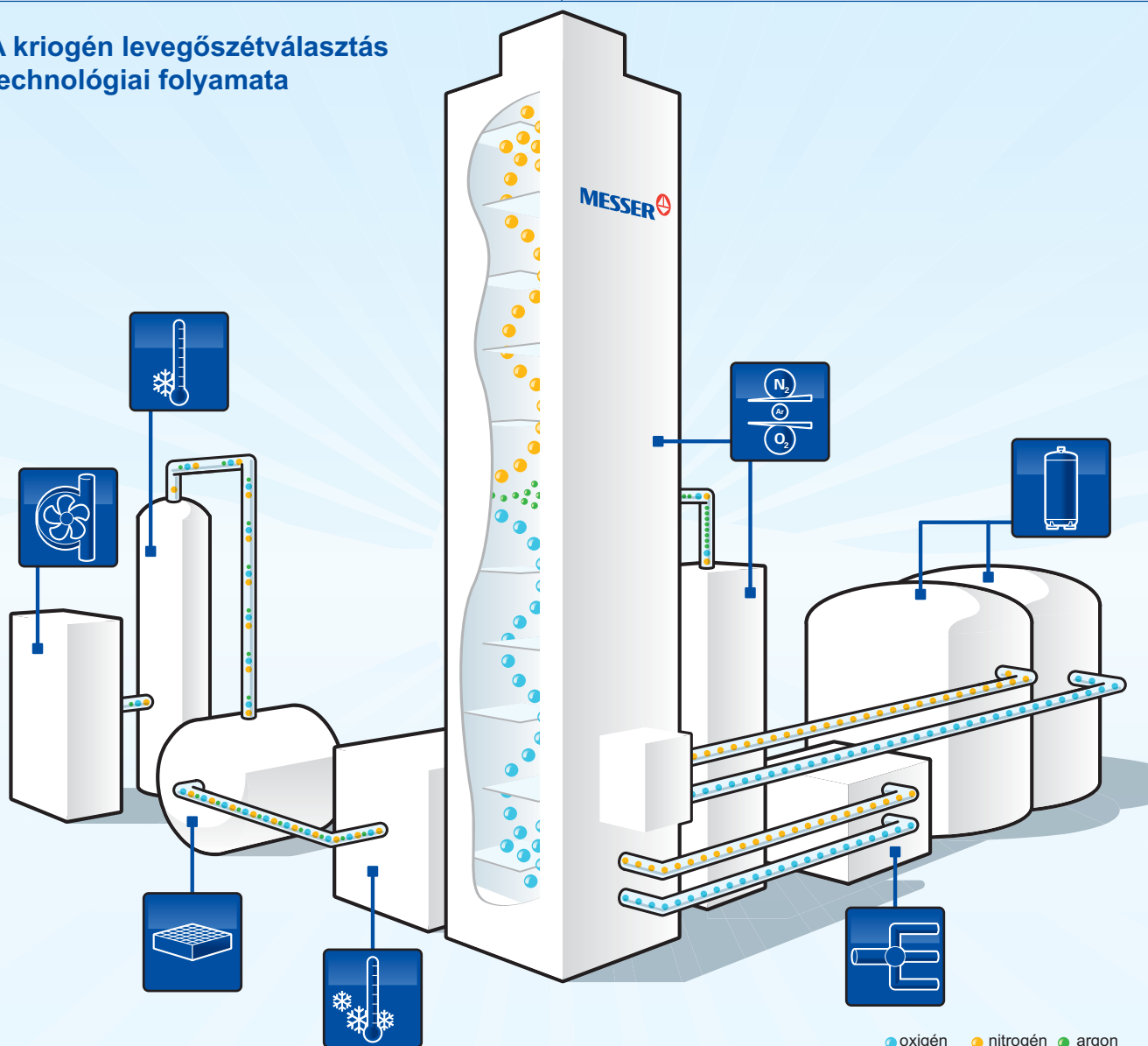
Egy univerzális nagyberendezésből, amely 200 000 m³/h levegőt dolgoz fel, óránként elméletileg közel 40 000 m³ oxigénnel és 160 000 m³ nitrogénnel kívül kb. 1800 m³ argon, 3,1 m³ neon, 1,0 m³ hélium, 0,2 m³ kripton és 0,016 m³ xenon nyerhető ki.

A rektifikáláshoz a légköri levegőt cseppfolyósítani kell, amelyet előbb expanziós (nyomáscsökkentéses) hűtőfolyamatokkal (lásd az 1. fejezet „Műveletek gázokkal” című részét) le kell hűtenünk a cseppfolyósodási hőmérsékletre. Ehhez viszont mindenekelőtt kompresszorral végzett levegősűrítés, majd a kriogén hőmérsékleten megszilárduló, és így dugulást okozó, illetve robbanásveszélyes és más szennyező alkotórészek – főképpen a vízgőz és szén-dioxid, illetve az acetilén és nagyobb szénatomszámú szénhidrogének – eltávolítása szükséges.

Az általában megvalósított teljes technológiai folyamatot ezek alapján nagy vonalakban a következő oldalon mutatjuk be.



A kriogén levegőszétválasztás technológiai folyamata



● oxigén ● nitrogén ● argon



A levegő sűrítése

A beszívott, mechanikus szennyezőktől a **porszűrőben** megtisztított környezeti levegőt **kompresszor** sűríti a technológiától megkövetelt nyomásra (pl. 6 bar), amely nyomás a modern technológiák esetében a korábbi eljárásokhoz képest általában lényegesen kisebb, ezért a régebbi dugattyús kompresszorok helyett az új technológiákban főleg nagy szállítóteljesítményű turbókompresszorok működnek.



A levegő előhűtése

A kompressziós hőt vízes hűtőkben vonják el, az adszorpciós tisztítási fázis előtt azonban – az adszorpciós hatások és kapacitás növelésére – a levegőt még tovább, többnyire 1 és 4 °C közé célszerű hűteni. Ezt a műveletet általában freon töltetű ipari hűtőgépekkel végzik.



A levegő tisztítása

Manapság a komprimált levegőt vízgőz és szén-dioxid tartalmától, váltakozva – adszorpciós és deszorpciós fázisban – működő, **molekulaszítával** (szintetikus zeolittal) töltött **adszorberekben** tisztítják meg annak érdekében, hogy ezek az alkotórészek a technológia alacsony hőmérsékletű szakaszain, szilárd alakban kicsapódva, ne okozzanak zavart. A molekulaszita előnye a régi kétlépéses lúgos, szilikagélés tisztítással szemben, hogy a töltet nem használódik el, mivel regenerálható, valamint a H₂O és CO₂ egyidejű eltávolításán kívül az egyéb káros levegőszennyezőket, mint például a robbanásveszélyt jelentő acetilént is megköti.



A levegő cseppfolyósítása

Ezután a tiszta levegő a **hőcserélőkben**, az ellenáramban kimenő hideg gázoktól előhűtve kerül adiabatikus–munkavégzéses és fojtásos **expanzióra**, ami után cseppfolyósodva a **rektifikáló oszlopba** jut. A korszerű, modern technológiákban a hűtési teljesítmény nagy részét expanziós turbinák adják. Amennyiben a termékeket cseppfolyós állapotban vesszük el, akkor ál-

talában külön hűtőkörnyezetet kell alkalmazni. A csöves, illetve manapság inkább lemezes hőcserélők helyett – főleg kisebb terméktisztasági igény esetében – regenerátorokat is használnak, amelyek töltetén váltakozva áramlik át a hűtő termék, illetve a hűtendő levegő.



A levegő szétválasztása

A cseppfolyós levegő tiszta oxigénre és nitrogénre történő szétválasztása kétszlopos rendszerű **rektifikáló oszlopban** megy végbe. Az alsó oszlopban közepes, a felső oszlopban kis, közel légköri nyomás uralkodik, köztük pedig egy hőcserélő, az ún. kondenzátor helyezkedik el. A szétválasztás alapja a levegő alkotórészeinek forráspont-különbsége, amint azt az előzőekben részleteztük. A cseppfolyós levegő folyamatos desztillálásával (egyidejű többszöri elgőzölögtetésével és kondenzáltatásával) a rektifikáló oszlopban felfelé áramló gőz egyre dúsabb nitrogénben, a lefelé folyó folyadék pedig oxigénben. Az oxigén megfelelő tisztaságának eléréséhez az alsó oszlop alján összegyűlő ún. nyers oxigént a felső oszlopban egy másodszori rektifikálásnak kell alávetni.

Az argon kinyeréséhez további desztilláló oszlop(ok) és technológiai lépés(ek) beiktatása szükséges (mint például a **2.4 ábrán** bemutatott technológiában).



A termékek kinyerése és tárolása

Az alsó oszlop tetején, a kondenzátor alatt felgyűlő tiszta cseppfolyós nitrogént, a felső oszlop alsó részéről pedig a tiszta cseppfolyós oxigént vezetik el termékként a kriogén tárolótartályokba (lásd még a **2.5 ábrát**), ahonnan kriogén szállítótartályokkal kerülhetnek a felhasználókhoz, vagy nagynyomású kriogén folyadékszivattyúkkal, elpárologtatókon keresztül palackozhatók.

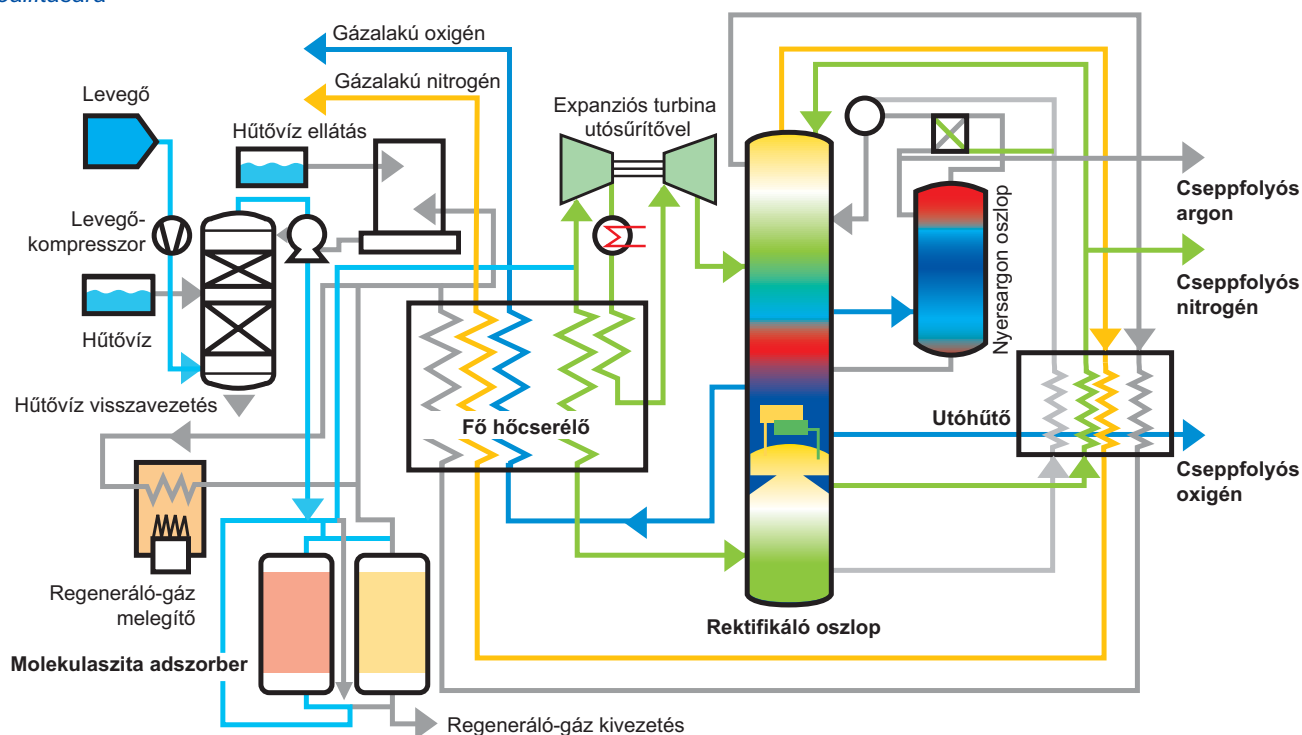
Gázalakú kinyerés esetében a fenti ábrán látható módon csővezetékes ellátás is megoldható, ilyenkor a közbelső tárolás puffertartályban (vagy gázométerben) történik, a szállítási nyomás eléréséhez pedig kompresszorra van szükség.

Az univerzálisabb rendszerekben gázalakú, valamint cseppfolyós oxigén és nitrogén, ezenkívül argon is nyerhető, amint azt egyszerűsített folyamatábránk (2.4 ábra) mutatja, a gyakorlatban azonban, különösen az on-site technológiák esetében, a berendezések egy vagy két termék előállítására vannak specializálódva.

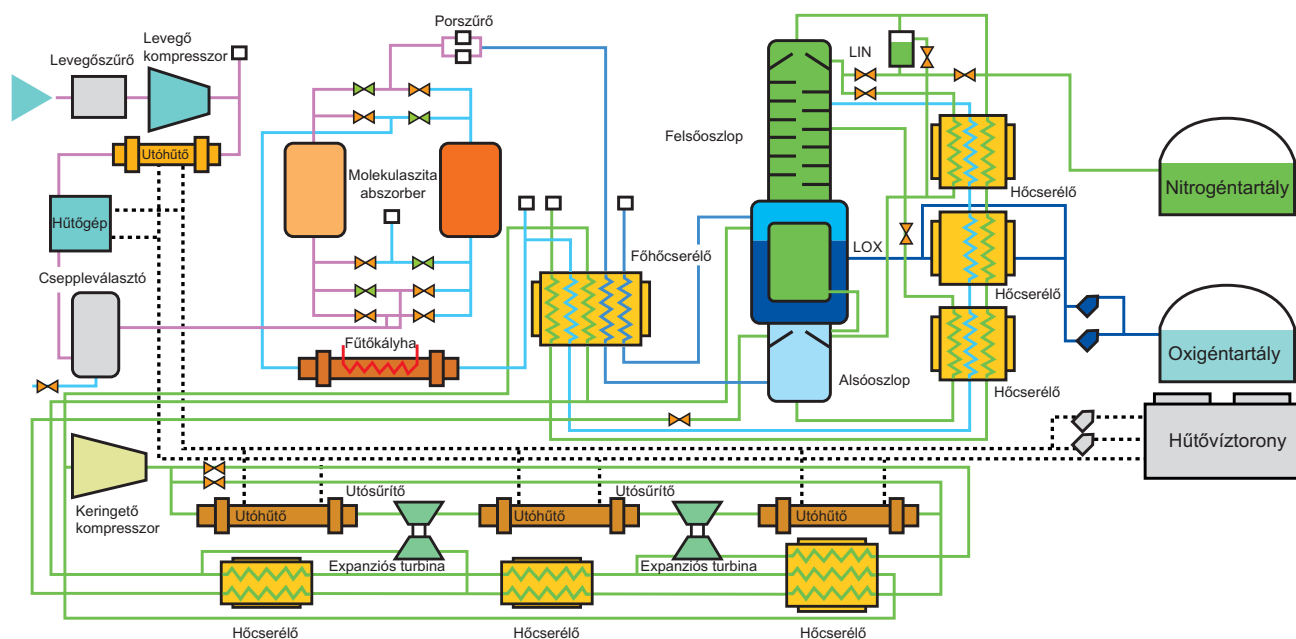
A 2.5 ábra például egy olyan technológiai rendszert mutat be, amely nagytisztaságú cseppfolyós nitrogén (LIN) és csepp-

folyós oxigén (LOX) termelésére alkalmas. Itt, mivel az argon kinyerésére nincs külön mellékoszlop, a levegő argontartalmát – hogy ne kerüljön az oxigénbe vagy a nitrogénbe, ezáltal azok tisztaságát lerontva – az úgynevezett maradékgázzal vezetik ki a felső oszlopból a fő hőcserélőn keresztül, és utána tovább melegítve ez a gázáram végzi a molekulaszita adszorberek regenerálását.

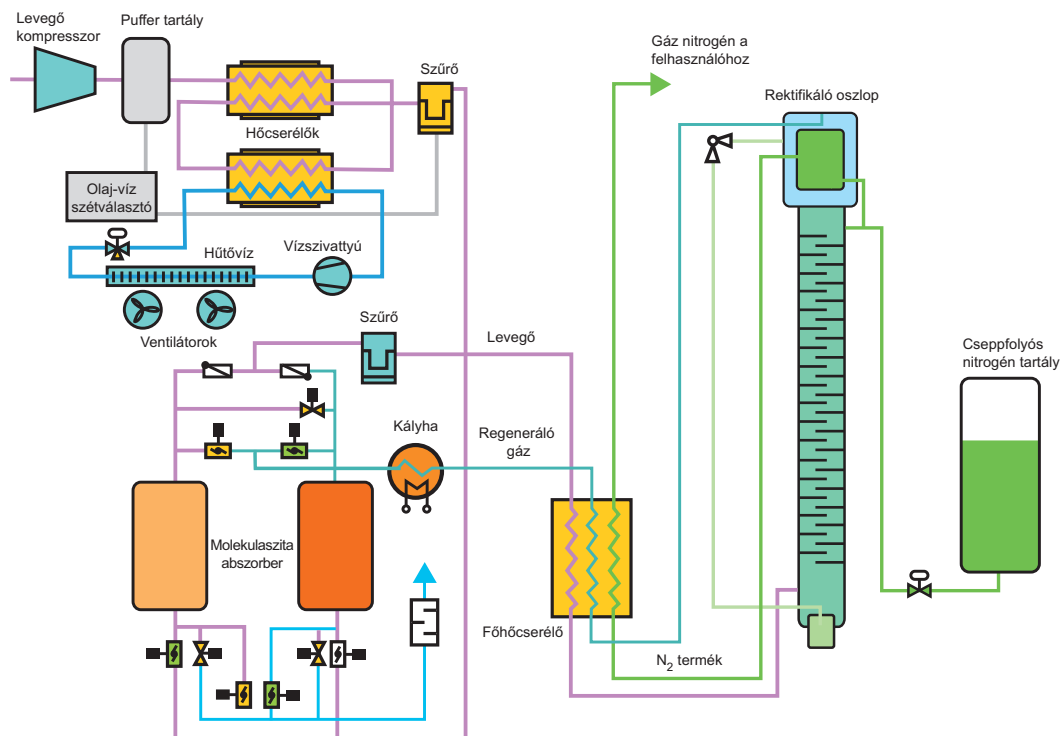
2.4 ábra Levegőszétválasztási technológia gázalakú és cseppfolyós oxigén, gázalakú és cseppfolyós nitrogén, valamint argon előállítására



2.5 ábra Levegőszétválasztási technológia cseppfolyós oxigén és cseppfolyós nitrogén előállítására



2.6 ábra On-site generátor nagytisztaságú nitrogén előállítására



A 2.6 ábra viszont egy kizárólag nagytisztaságú nitrogén helyi felhasználására specializált, on-site generátor technológiát érzékeltet, amelyben – mivel oxigént nem kell előállítani – a kétrészes rektifikáló oszlop helyett csak egyrészes oszlop működik úgy, hogy a felső oszlopot csak az alsó, soktányéros rész tetején lévő kondenzátor gáztere képviseli. A helyi, folyamatos gázalakú nitrogén felhasználás mellett a kriogén tárolótartályba (illetve tartályokba) kisebb mennyiségű cseppfolyós nitrogén is kerül, amely tartalékként vagy más felhasználásra elszállítva felhasználható.



On-site nitrogén generátor Nyergesújfalun

