

A VEGYÉSZMÉRNÖKI TUDOMÁNY ALAPJAI II.

Stacionárius műveleti egységek leírása

D. R. BENEDEK PÁL*

A vegyi anyagok gyártása, tehát az az út, amelyen az alapanyagok a késztermékig eljutnak, különböző fizikai és kémiai átalakítások egymást követő sorozatát foglalja magában. Az anyagnak egy-egy ilyen átalakítását tekintet nélkül arra, hogy ez kémiai vagy fizikai jellegű, egyedi műveletnek nevezzük. Innen származik a nagyipari műveletek általános elméletével foglalkozó tudomány elnevezése a vegyi művelettan. A kémiai technológia tudománya, amely a vegyipari anyagok nagyipari gyártásának tudománya, ilyenformán két nagy fejezetre osztható.

Kémiai technológia és művelettan

Az egyik fejezet — amelyet szűkebb értelemben — ugyancsak kémiai technológiának neveznek — az egyes anyagok esetleg különböző nyersanyagokból kiinduló — gyártásának problémakörével foglalkozik és tulajdonképpen technológiai ágazatok — mint pl. ásványolajtechnológia, mezőgazdasági iparok technológiája, szilikátkémiai technológia stb. — összessége. A másik nagy fejezet a vegyipari művelettan, amely az egyedi műveletek — pl. desztilláció, adszorpció, szárítás stb. . . tárgyalásának összessége. Az ágazati technológiák és a művelettan tanulmányozásának tárgya tehát egy és ugyanaz, vagyis a vegyi anyagok gyártása, azonban az a pozíció, amelyből az egyik vagy másik tudomány szak művelője vizsgálódik más és más. Ezt a gondolatot talán megvilágíthatja a következő példa:

Magyarországon ma aktuális kérdés a polietilén gyártásának bevezetése. Ez a kérdés két ágazati technológiát érint. Az egyik szakmája az organikus nagyipari kémiai technológia, a másiké a műanyagtechnológia. Az organikus technológus feladata, hogy kiválassza az etilén gyártás, a műanyagtechnológus feladata, hogy kiválassza az etilénpolimerizáció magyarországi viszonyok között legmegfelelőbb variánsát a sok lehetőség közül. De mindkét feladat érinti a műveleti mérnököt is, akinek az adott technológiai úthoz méreteznie kell az egymás után következő átalakítások mind-egyikéhez a legmegfelelőbb készüléket, berendezést.

A kémiai technológiának ez a két fejezetre való felosztása gyakorlati szempontból célszerű és hasznos, de a vegyész mérnök szempontjából nem a szétválasztás, hanem az egység a lényeges és a gyakorlati munka szempontjából sem az egyik fejezet, sem a másik kizárólagos ismerete nem elégséges. Ez természetes is, mert ha az ágazati technológiák és a művelettan tanulmányi tárgya egy és ugyanaz, akkor adott esetben (a gyakorlatban) bármelyik nézőpont is kerül előtérbe, ez sohasem szorítja teljesen háttérbe a másikat. A vegyész mérnököt éppen az teszi vegyész mérnökké és éppen az különbözteti meg a kémikustól egyfelől,

a gépészmérnöktől másfelől, hogy a vegyi anyagok nagyipari gyártásának *egész* folyamatát (az egyes műveletek egybekapcsolódó összegét) és ennek egyes műveleteit a nagyipari kivitelezés és megvalósítás egységében fogja fel, szemléli, tervezi, irányítja, vezeti. E tekintetben közömbös, hogy a vegyész mérnök, a számára lehetséges három fő tevékenységi terület: kutatás, tervezés, üzemvitel melyikén dolgozik.

A művelettan tudományának kialakulása szoros kapcsolatban van a modern vegyi nagyipar megszületésével és fejlődésével. A vegyi termékek gyártási volumenének megnövekedése ugyanis nemcsak a berendezések megsokszorozásával és növelésével járt, hanem magával hozta az anyagfeldolgozásának és átalakításának új megoldási módjait és sajátos készülékeit s ezzel kapcsolatban a megoldási módok és készülékek elméletét: a művelettant is. Anélkül, hogy ennek az egyébként érdekes tudománytörténeti mozzanatnak elemzésével és modern vegyi nagyipar jellemző vonásainak akárcsak vázolásával is időt töltenénk, egy, a további tárgyalást befolyásoló tényezőt meg kell említeniünk.

A korszerű vegyi nagyipar egyik jellegzetes vonása a gyártás folyamatossága és általános tendenciája, hogy az eddig még folyamatossá nem tett manipulációkat folyamatossá tegye. Ennek a tendenciának eredményeként az utóbbi két évtizedben — és főképp azzal kapcsolatban, hogy szemeses szilárd anyagok (katalizátorok, adsorbensek mozgatására bevezették a gravitációs és pneumatikus szállítási módokat — olyan eljárásokat is sikerült folyamatossá tenni, amelyek szilárd és gázfázisú anyagok érintkezésén alapulnak (katalitikus krakkolás, adszorpció).

Míg az alapanyagból termék lesz, az anyag a technológiai manipulációk egymást követő sorozatában vesz részt. A folyamatosság akkor valószínűleg meg, ha minden egyes manipulációt a célnak, mégpedig egyetlen célnak megfelelő műveleti egységben hajtunk végre, s az átalakulásban levő anyagot szállítjuk keresztül az egységek sorozatán.

Ezért tekintjük fejtegetéseink fő témájának a *folyamatosüzemű* gyártás egészének, valamint egyedi műveleteinek elméleti elemzését és leírását.

A folyamatos gyártás vegyész mérnöki leírása

Az alkimisták a vegyi reakciók végrehajtására szolgáló utasításokat hosszú, szövevényes, a dolog lényegéhez nem is kapcsolódó megjegyzésekkel tarkított receptekben írták le. A modern vegyi nagyipar mérnöke sem nélkülözheti a recepteket. Rövid, szabatos és világos recepteket: technológiai utasításokat vár vagy ilyeneket ad. Valóban rövid, szabatos, és világos, tényleg csak a lényegre szorítkozó lehet a recept akkor, ha rajzban rögzít-

*Veszprémi Vegyipari Egyetem.

jük. Ha az alapanyagtól a termékig vezető gyártás folyamatát egyezményes, szabványosított jelképekkel és jelölésekkel rajzoljuk és írjuk le, olyan ábrához jutunk, amely a technológiai utasításokat röviden, szabatosan, világosan, emellett összefüggéseiben, de mindenféle kommentár nélkül tartalmazza. A technológiai leírásoknak és utasításoknak ezt a rajzos formáját szokás *folyamatábrának* nevezni.

A folyamatábrák azért alakultak ki és terjedtek el a vegyészmérnöki gyakorlatban, mert különösképpen kedvezően tükrözik vissza a gyártás folyamatosságát.

A MSZ 2958—52 és 2959—52 szabvány háromféle folyamatábrát különböztet meg.

Elvi folyamatábra

Az elvi folyamatábrán az egyes műveleteket a szabványban felsorolt jelképekkel jelöljük, tekintet nélkül a folyamatban alkalmazott készülékek és gépek típusára, alakjára, nagyságára, számára, feltüntetve azonban a műveletekben résztvevő anyagok vegyi képletét, összetételét és főbb mennyiségi¹ adatait.

Az elvi vázlat tehát útmutatást ad

- a) az alapanyagok, közbülső termékek és végső termékek kémiai összetételére,
- b) az egyes műveletek sorrendjére,
- c) és a készülékek és gépek jellegére.

A helyesen készített elvi vázlat minden további felirat vagy magyarázat nélkül megérthető és olvasható. A folyamatot az elvi vázlaton — és minden folyamatábrán — balról jobbra felépítve ábrázoljuk. A jelképet a folyamatok ábrázolásánál az átalakulásban levő anyag útját jelképező vastag vonallal oly módon kell összekötni, hogy azok folytonos láncot alkossanak. Az áramlási irányt közvetlenül a vonalakra nyíllal kell rájelölni. Az összetételt és vegyi képleteket a vonal fölé, a mennyiséget a vonal alá kell bejelölni. Az elvi vázlat a legszükszavúbb és valóban elvi, pontosabban szólva a folyamat megértéséhez szükséges minimális közlést tartalmazza.

Elvi folyamatábra két úton jöhet létre. Egyrészt valamely meglévő, üzem gyártási folyamatát akarjuk ilyen ábrán rögzíteni, vagy egy létesítendő, tervezendő és megépítendő üzemre vonatkozóan ilyen ábrán közli a kutató vagy tervező első elképzeléseit.

Technológiai folyamatábra

A technológiai folyamatábra az alkalmazott gépeket és készülékeket lehetőleg lépték és színhelyesen², ezek kapcsolását, valamint a készülékbe és gépbe be, ill. onnan kilépő valamennyi anyagot, a szükséges kémiai és fizikai adatokat és a mennyiségi adatokat tünteti fel. A technológiai folyamat-

¹ A mennyiségi adatot csupán azért szokás közölni, hogy az elvi folyamatábrából is megítélhető legyen az üzem mérete.

² Ezek szabvány szavai. A műszaki gyakorlat a lépték és színhelyes folyamatábrákhoz nem ragaszkodik.

ábra tartalmazza a főfolyamatot, valamint az érthetőséghez szükséges mellékfolyamat csővezeték kapcsolását, viszont a teljes összefüggő csővezeték kapcsolást mellőzi. (A párhuzamos készülékek a példányszám jelölésével, de csupán egyszer szerepelnek.)

A technológiai folyamatábra tehát útmutatást ad:

a) kvantitatívan az alapanyagok, közbülső termékek, segédanyagok (gőz, víz) kémiai összetételére és mennyiségére, vagyis magában foglalja a teljes technológiai folyamat anyagforgalmát;

b) emellett az alapanyagok, közbülső termékek, segédanyagok fizikai (termodinamikai) állapotára, vagyis magában foglalja a teljes technológiai folyamat energiaforgalmát;

c) az egyes műveletek sorrendjére, és ezen felül a főfolyamat és mellékfolyamatok kapcsolataira az egyes műveletek során;

d) az alkalmazott gépek és készülékek típusára, számára és ha lehet alakjára és nagyságára.

Technológiai folyamatábra két úton jöhet létre. Vagy valamely meglévő üzemből akarjuk a technológiai folyamatot egy ilyen ábrán rögzíteni (esetleg azzal a céllal, hogy a folyamat anyag- és energiaforgalmát ennek alapján kiszámítsuk, majd elemezzük és értékeljük); vagy pedig valamely létesítendő üzemre vonatkozóan akarjuk ilyen ábrán összefoglalva közölni az anyagforgalomra és energiaforgalomra vonatkozó számítások eredményét, hogy ez a tervezési munka egy további fázisához kiindulásként szolgáljon. A technológiai folyamatábra tehát a legszorosabb kapcsolatban van a folyamat anyag- és energiaforgalmával, és csakis konkrét, egyedi formában készíthető el.

A gyártási folyamatábra

A gyártási ill. szerelési folyamatábra az alkalmazott gépeket és készülékeket jelképeivel, vagy azok rendelkezésére álló leegyszerűsített körvonalrajzával, lehetőleg lépték³ és színhelyesen, valamint a teljesen összefüggő csővezetékkapcsolást, az összes műszerekkel és szerelvényekkel, ezek nagyságrendi és üzemi adataival együtt tünteti fel. A gyártási ill. szerelési folyamatábrán mellőzni kell minden mennyiségi adatot, valamint minden olyan adatot, amely a folyamatban résztvevő anyagok kémiai vagy fizikai állapotára vonatkozik.

A műszerezés leírása

A gyártási folyamatábrán fel kell tüntetni az összes beépített műszert. Nyilvánvaló dolog azonban, hogy a műszerek technológiai szereppel bírnak, s éppen ezért a mérnöki gyakorlat gyakran szabályellenesen az elvi vagy a technológiai folyamatábrán dolgozza ki a gyártási folyamat műszerezését.

A műszerezést gyakran külön olyan folyamatábrán is feltüntetik, amelyen a műszerezést emelik ki és amelyről elhagyják azokat kvantitatív leíró

³ Lásd a technológiai folyamatábrával kapcsolatos megjegyzést.

adatokat, amelyek a technológiai folyamatot jellemzik (ti. a technológiai folyamatábrán), valamint azokat az adatokat, amelyek a berendezésekre jellemzők (ti. a gyártási folyamatábrán). Az ilyen műszerezési folyamatábrára általában a műszerezésre „Az üzemi műszerezés tervjelképe” című MSZ 14 000 szabvány mérvadó.

A technológiai folyamatábrára leíró adatai

A technológiai folyamatábrán számos, a folyamatot leíró kémiai és fizikai adatot találunk. A szabvány előírja, hogy ezeket az adatokat jellegeknek megfelelően, hogyan, miképpen kell elhelyezni az ábrán, milyen mértékegységeket kell használni, de nem mond semmit sem arra vonatkozóan, hogy hány adatot kell, lehet vagy szabad megadni. A jelenlegi mérnöki gyakorlat az adatok számát illetően prakticista és az a törekvése, hogy egyfelől ne tüntesse fel valamennyi adatot, amely teljesen leírja az üzemi egységet, hanem ezek közül csupán azokat, amelyeket fontosnak ítél; másfelől viszont, megint csak célszerűségi okból, helyként műszaki pleonazmust követ el, ugyanazt az adatot kétféleképpen is közli. Ezzel a mérnöki gyakorlattal kapcsolatban a vegyi művelettan elméletében két kérdésre kell felelni.

1. Mennyi azon adatok száma, amelyek egy üzemi egység teljes leírásához szükségesek?

2. Mennyi azon adatok minimális száma, amelyek egy üzemi egység egyértelmű leírásához szükségesek?

E kérdéshez különösképpen napjainkban egy harmadik is járul, nevezetesen a következő:

3. Hány szabályzó műszert kell adott gyártási folyamatban elhelyezni ahhoz, hogy a teljes gyártási folyamat az előzetesen meghatározott optimális körülmények között, emberi beavatkozás nélkül működjék?

Az első két kérdés megválaszolásakor figyelembe kell venni, hogy mindig csupán egy bizonyos meghatározott szempontból való leírásról lehet beszélni. A vegyipar műveleteit általában nem szükséges elektromos, mágneses vagy határfelületi jelenségek szempontjából leírni, rendszerint elhagyható az áramló anyagok potenciális és kinetikus energiája is és ezért mi a továbbiakban mindig az áramló anyagok mennyisége, termodinamikai állapota, valamint a műveleti egységek⁴ hőforgalma szempontjából teljes, illetőleg egyértelmű leírásáról beszélünk. Ennek megfelelően a leírás akkor teljes, ha megadja:

1. a műveleti egység minden be és kilépő pontján az áramló anyag mennyiségét komponensenként,

2. ugyanezekben a helyeken az áramló anyag termodinamikai állapotát (két intenzív állapot-határozóval),

3. a műveleti egység hőforgalmát.

⁴ A műveleti egység kifejezést használjuk akkor, ha általános tételket nem akarunk konkrét formában kifejezni a teljes gyártásra, annak egy-egy kiválasztott egyedi műveletére, vagy egy kiválasztott egyedi művelet tetszés szerinti keresztmetszetére.

A leírás akkor egyértelmű, ha az előbb felsorolt adatok közül annyit közöl, amennyi az összes (ti. a teljes leírásnak megfelelő) többi adat kiszámításához szükséges és elégséges.

Tömegmérlegek

Az előbb hangsúlyoztuk, hogy a modern vegyi nagyipari gyártás egyik jellegzetes vonása a folyamatosság. A folyamatosság úgy valósítható meg, hogy a gyártási folyamat során valamennyi műveleti készüléken keresztüláramlik az átalakulásban levő anyag. Minden műveleti készüléknek tehát bizonyos anyagkészlete van és üzeme akkor folyamatos mennyiségi szempontból, ha anyagkészlete az időben nem változik. A tömegmegmaradás törvénye ennek megfelelően azt követeli, hogy egy bizonyos idő alatt a műveleti egységbe belépő és onnan kilépő tömegek egyenlők legyenek. Ha a nyílások száma a műveleti egységben n , akkor

$$\sum_{i=1}^{i=n} L_i = 0 \quad (1)$$

ahol L_i jelenti az i -ik nyíláson az időegységben átáramló anyag teljes mennyiségét (kg/h), mégpedig a belépő áramot pozitív, a kilépő áramot negatív előjellel.

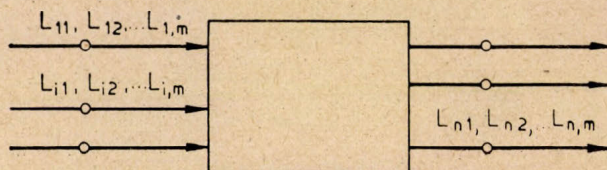
A tömegmegmaradás (1) egyenletét, amelyet a teljes anyagmennyiségre írtunk fel, a vegyészmérnöki gyakorlatban *brutto tömegmérlegnek* nevezzük. A tömegmegmaradás törvénye specifikusan is érvényes, vagyis az átáramló fluidum minden egyes, kémiai átalakulást nem szenvedő komponensére. Ha a műveleti egységen (1. ábra) keresztülhaladó m komponensű elegy kémiai reakcióban nem vesz részt, írhatjuk a j -ik komponensre, hogy

$$\sum_{i=1}^{i=n} L_{ij} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

ahol L_{ij} jelenti az i -ik nyíláson az átáramló anyag j komponensének az időegységben átfolyó mennyiségét (kg/h).

A tömegmegmaradás j komponensére felírt (2) egyenletét (mivel az egyetlen komponensre érvényes) *specifikus tömegmérlegnek* nevezzük. Kézenfekvő, hogy valamennyi specifikus tömegmérleg összege a bruttó tömegmérleghez vezet, vagyis:

$$\sum_{j=1}^{j=m} \sum_{i=1}^{i=n} L_{ij} = \sum_{i=1}^{i=n} L_i = 0 \quad (3)$$



1. ábra

Mennyiségi szempontból akkor teljes a műveleti egység leírása, ha minden átömlő keresztmetszeten minden egyes komponens hozamát rögzíti, vagyis esetünkben $m \cdot n$ adatot foglal magában.

A (2) egyenlet tulajdonképpen egy m egyenletes, mn ismeretlenes, lineáris egyenletrendszer, amely akkor válik megoldhatóvá, ha annyi számú ismeretlen értékét rögzítjük, hogy a megmaradó ismeretlenek száma az egyenletek számával egyenlővé váljék. Legyen a rögzítendő ismeretlenek száma F és akkor

$$n \cdot m - F = m$$

ahonnan

$$F = m(n - 1) \tag{4}$$

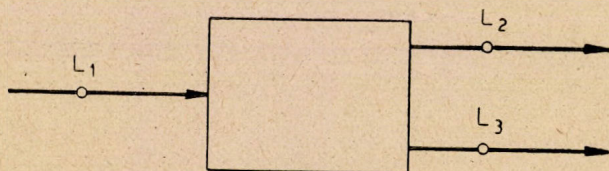
Ez más szóval azt jelenti, hogy habár a műveleti egység teljes leírásához mennyiségi szempontból mn adat szükséges, mégis egyértelmű leírásához F adat is elégséges, mert ebből az F adatból a (2) egyenletrendszer segítségével, az összes többi nem közölt adat egyértelműen meghatározható. A (4) nem tartalmaz kikötést arra, hogy a leíró adatok közül melyeket kell megválasztani. A teljes leírásához szükséges mn adat közül szabadon választhatunk meg F számot, szabadon választhatjuk meg ezek értékét is, olyan intervallumban, amelyben a paraméterek között uralkodó egyenletek egyáltalán lehetővé teszik, s ezért szokás a szabadon rögzíthető leíró adatok számát *szabadsági fok*-nak nevezni.

A szabadsági fok valamely műveleti egység meghatározott szempontból teljes leírásához szükséges adatok száma és ezen adatok között fennálló összefüggések száma közötti különbség. Ezért tehát valamely műveleti egység szabadsági foka megegyezik egyértelmű leírásához szükséges és elégséges adatok számával.

Homogén anyag esetén előző egyenletünk a következő alakot ölti:

$$F = n - 1 \tag{5}$$

ami azt jelenti, hogy az egységet habár nem teljesen, de egyértelműen ($n - 1$) adat is leírja. Ez másfelől azt is jelenti, hogy egy ilyen egységnek csupán ($n - 1$) technológiai paraméterét lehet a tervezésben vagy üzemvitel során szabadon megválasztani. Példaképpen a 2. ábrán egy elágazás technológiai folyamatábráját



2. ábra

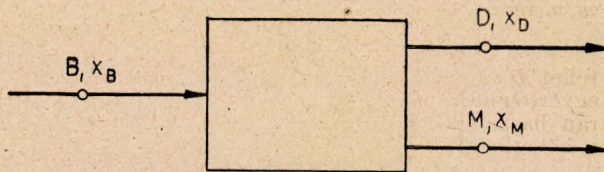
mutatjuk meg. Az ábrából rögtön látható, hogy a három mennyiségi adat közül (5) egyenlettel összhangban kettőt lehet szabadon megválasztani, mert a

$$L_1 - L_2 - L_3 = 0$$

tömegmérleg miatt a harmadik értéke már egyértelműen meghatározott

A 3. ábra valamely vegyipari elválasztó berendezést mutat be. Ha ez csupán 2 komponensű elegy elválasztására szolgál, szabadsági foka:

$$F = 2(3 - 1) = 4$$



3. ábra

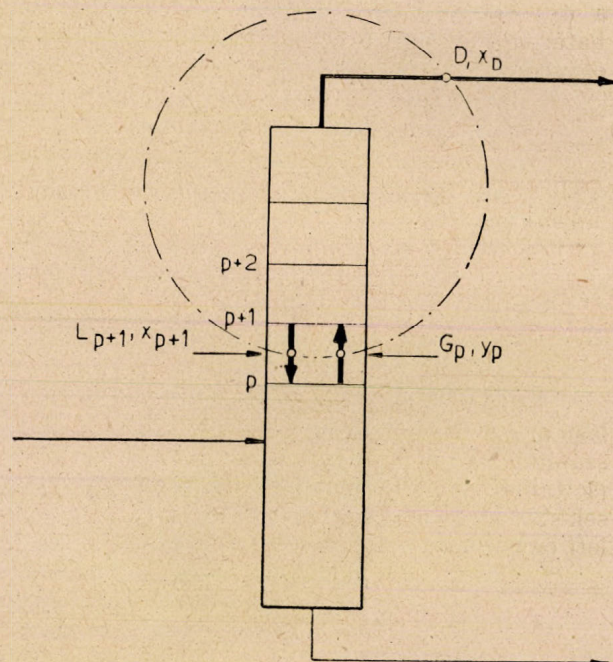
a teljes leírásához szükséges hat adat (B, D, M, x_B, x_D, x_M)⁵ közül tehát négyet lehet megválasztani, s ezzel megmaradó kettő értékét egyértelműen meghatároztuk. Ez teljesen érthető, mert hiszen a hat paraméterrel két független egyenlet írható fel, a bruttó és az egyik komponens specifikus tömegmérlege:

$$B = D + M \tag{6a}$$

$$Bx_B = Dx_D + Mx_M \tag{6b}$$

bármelyik két független változó értéke tehát kiszámítható.

A 4. ábrán ugyanezt az egységet kissé részletesebben rajzoltuk fel, nevezetesen úgy, hogy az egyes tényezőket is figyelembe vettük. A kérdés a következő: Meghatározható-e a torony egy kiszemelt (p -vel jelzett)



4. ábra

tányérjáról felfelé áramló és erre a tányérra a fölötte levőről érkező anyagáram összetétele. Ha ezúttal is kétkomponensű elegyről van szó ($m = 2$), akkor mivel $n = 3$, a szabadsági fok továbbra is:

$$F = 2(3 - 1) = 4$$

a toronyrészlet teljes leírásához szükséges hat adat ($G_p, L_{p+1}, D, y_p, x_{p+1}, x_D$) közül tehát négy szabadon választható. A hat paraméterrel két független egyenlet írható fel:

a részleges globális tömegmérleg:

$$G_p = L_{p+1} + D \tag{7a}$$

⁵ mert hiszen:

$$\begin{aligned} B_1 &= x_B B & B_2 &= (1 - x_B) B \\ D_1 &= x_D D & D_2 &= (1 - x_D) D \\ M_1 &= x_M M & M_2 &= (1 - x_M) M \end{aligned}$$

és a részleges specifikus tömegmérleg:

$$G_p y_p = L_{p+1} x_{p+1} + D x_D \quad (7b)$$

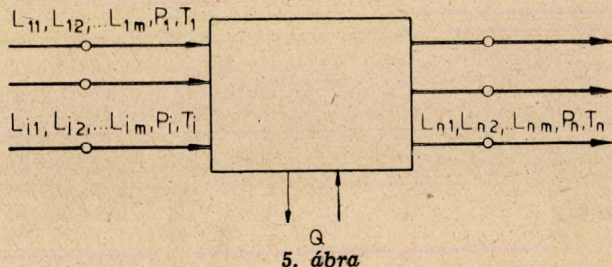
tehát D , L_{p+1} , x_{p+1} és x_D rögzítése esetén y_p értéke egyértelműen meghatározott. Ezt az egyenletet gyakran használják diffúziós műveletek számításánál még a következő alakban:

$$y_p = \frac{L_{p+1}}{G_p} x_{p+1} + \frac{D}{G_p} x_D = \frac{L_{p+1}}{L_{p+1} + D} x_{p+1} + \frac{D}{L_{p+1} + D} x_D \quad (7b)$$

Nem célunk, hogy a tömegmérleg számításának és készítésének metodikáját ismertessük, s bemutassuk a tömegmérleg eredményét közlő táblázatokat és rajzokat (az ún. tömegábrák) szokásos alakjait. A témának elég terjedelmes irodalma van [1-4], ahol az olvasó a részletekre vonatkozóan további utalásokat találhat.

Entalpiamérlegek

A technológiai folyamatábrán nemcsak az átalakulásban levő anyag mennyiségét kell megadni a kijelölt pontokon, hanem termodinamikai állapotát is. A termodinamika tanítása szerint az adott összetételű és mennyiségű homogén fázis összetételét két intenzív állapotahatározó adat (pl. a nyomás és a hőmérséklet) egyértelműen meghatározza. Emellett nyilvánvaló, hogy a műveleti egységre érvényes az energiamegmaradás tétele is.



5. ábra

A Q -kcal/óra hőforgalmat lebonyolító n nyílású műveleti egység (5. ábra) szabadsági fokának számításához a következőket vegyük figyelembe (1. táblázat) (feltéve, hogy a szereplő komponensek száma m és kémiai reakcióról nincs szó a műveleti egységben):

1. táblázat

| I. A leíró adatok jellege | száma |
|---|---------------|
| 1. Az áramló anyag összmennyisége, L_i | n |
| 2. Az áramló anyag termodinamikai állapota minden helyen, $(m + 1)$ | $n(m + 1)$ |
| 3. A műveleti egység hőforgalma, Q | 1 |
| Ez összesen | $2n + nm + 1$ |
| II. Az összefüggések jellege | száma |
| 1. Specifikus tömegmérleg, $\sum_1^n L_{ij} = 0$ | m |
| 2. Energiamérleg | 1 |
| Ez összesen | $m + 1$ |

A szabadsági fok tehát:

$$F = 2n + m(n - 1) \quad (8)$$

ahol azonban még kérdés, hogy az energiamegmaradás tételét hogyan kell szabatosan és célszerűen figyelembe venni.

Rögzítsük a $2n + m(n - 1)$ szabadsági fok terhére $(n - 1)$ átömlő hely mindegyikén az átáramló anyag összmennyiségét (L_i) és összetételét $(m - 1)_i$, továbbá n helyen nyomását (P_i) és fajlagos térfogatát (v_i). Ismeretlen marad az összetétel és az átfogó összmennyiség (L) az egyetlen nem kitüntetett helyen, ez érték azonban (2) tömegmérleg segítségével meghatározott. Foglalkozunk most a műveleti egység hőforgalmának problémájával és alkalmazzuk a műveleti egységre a termodinamika I. főtételeit:

$$L_i u_i = Q + W \quad (9)$$

ahol

u_i az i -ik helyen átömlő anyag fajlagos szabad-energiája, W pedig a műveleti egységen átfolyó anyag végzett munkát jelenti.

Az 5. ábrából látható, hogy a műveleti egység semmiféle munkát nem forgalmaz az elkerülhetetlen térfogati munkán kívül s így

$$W = \sum_1^n L_i (P_i v_i) \quad (10)$$

ahol P_i illetőleg v_i az i -ik helyen átömlő anyag nyomása, illetőleg fajlagos térfogata. E két egyenlet összevonásával a

$$\sum_1^n L_i (u_i + P_i v_i) = 0 \quad (11)$$

kifejezéshez jutunk. Mivel az entalpia definíciója szerint [5]

$$h_i \equiv u_i + P_i v_i$$

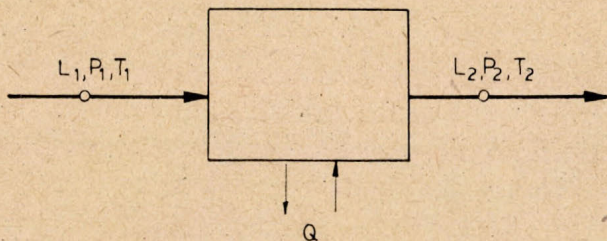
(11) egyenletünk még így is írható:

$$\sum_1^n L_i h_i = \sum_1^n H_i = Q \quad (12)$$

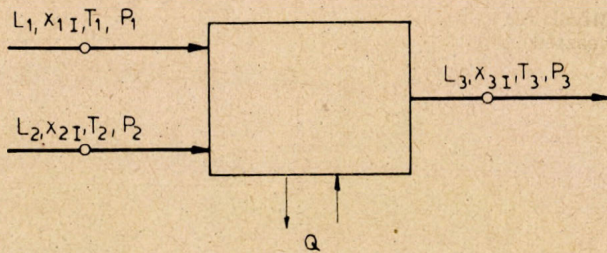
ahol H_i jelenti az i -ik nyíláson áthaladó L_i mennyiségű anyag relatív entalpiáját célszerűen kiválasztott alapállapotra vonatkoztatva. Ezt az egyenletet a műveleti egység entalpiamérlegének nevezzük⁶.

Amennyiben intenzív állapotahatározónak a nyomás mellett nem a fajlagos térfogatot, hanem a hőmérsékletet választjuk, ami a gyakorlatnak sokkal inkább megfelel, akkor, mivel a fajlagos entalpia egyértelmű függvénye a nyomásnak hőmérsékletnek és összetételnek: $h = f(P, T, x_1, x_2, \dots, x_m)$; nem nehéz áttérni a (12) egyenletre.

⁶ Felhívjuk az olvasó figyelmét Erdey-Gruz Tibor: *A fizikai kémia alapjai* c. könyvének az entalpiamérlegekkel foglalkozó fejezetére (101. lap).



6. ábra



7b ábra

Például: 1. A 6. ábrán vázolt műveleti egységen egykomponensű anyagáram ($m = 1$) halad. A műveleti egység szabadsági foka:

$$F = 2 \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 5$$

Válasszuk intenzív állapotváltozóknak a hőmérsékletet és nyomást és rögzítsük L_1, P_1, T_1, P_2 és Q értéket, akkor a még ismeretlen két leíró adat egy tömegmérleggel és egy entalpiamérleggel kiszámítható, nevezetesen:

$$L_2 = L_1 (= L)$$

amivel kifejezésre jut az, hogy az anyagáram nem ágazik el és

$$Q = H_2 - H_1 = L(h_2 - h_1)$$

tehát a kilépő ponton a relatív fajlagos entalpia:

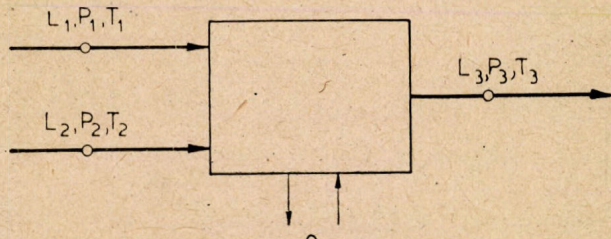
$$h_2 = \frac{Q}{L} + h_1$$

mivel ez csakis a hőmérséklet és nyomás függvénye:

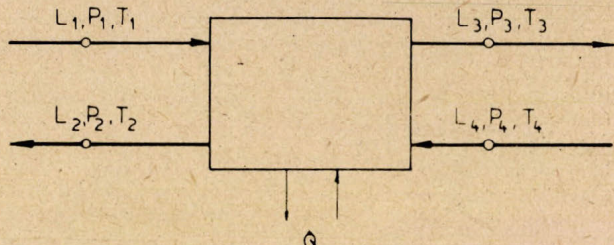
$$h_2 = f(P_2, T_2)$$

a keresett T_2 nyomás már rögzített P_2 értéke mellett, a most kiszámított h_2 entalpia által egyértelműen meghatározott.

2. Vizsgáljuk a 7a ábrán vázolt esetet, amely két anyagáram elegyedését tünteti fel. Az egyszerűség ked-



7a ábra



8. ábra

vért legyen egyenlőre $m = 1$. Ez esetben a műveleti egység szabadsági foka:

$$F = 2 \cdot 3 + 1 \cdot 2 = 8$$

Rögzítsük a teljes leírásához szükséges adatból a következő nyolcat:

$$L_1, L_2, Q, T_1, T_2, P_1, P_2, P_3$$

Az ismeretlen kettő (L_3 és T_3) kiszámítható, mert a tömegmérleg:

$$L_1 + L_2 = L_3$$

és az entalpiamérleg:

$$Q + L_1 h_1 + L_2 h_2 = L_3 h_3$$

esupán két ismeretlent (L_3 és h_3) tartalmaz, azonban h_3 a már rögzített P_3 nyomás mellett csakis az ismeretlen T_3 függvénye, tehát:

$$T_3 = T_3(h_3)$$

3. Vizsgáljuk az előző műveleti egységet abban a speciális esetben (7 ábra), ha $m = 2$. A műveleti egység szabadsági foka

$$F = 2 \cdot 3 + 2 \cdot 2 = 10$$

Rögzítsük az egységet teljesen leíró 13 adatból a következő tizet:

$$Q, L_1, L_2, x_1, I, x_2, I, T_1, T_2, P_1, P_2, P_3$$

ahol római szám indexszel a két komponenszt jelöltük. Az ismeretlen 3 leíró adat kiszámítható, három egyenlet írható fel.

A bruttó tömegmérleg:

$$L_1 + L_2 = L_3$$

a specifikus tömegmérleg:

$$L_1 x_1, I + L_2 x_2, I = L_3 x_3, I$$

és az entalpiamérleg:

$$Q + L_1 [x_1 I \bar{h}_1, I + (1 - x_1, I) \bar{h}_1, II] + L_2 [x_2 I \bar{h}_2, I + (1 - x_2, I) \bar{h}_2, II] = L_3 [x_3, I \bar{h}_3, I + (1 - x_3, I) \bar{h}_3, II]$$

ahol \bar{h}_{ij} jelenti a j -ik komponens parciális fajlagos entalpiáját az i -ik nyílásban, az ott uralkodó T_i hőmérséklet és P_i nyomáson az adott koncentrációviszonyok mellett. Ez utóbbi egyenletünk baloldalán minden adat ismert. A jobb oldalon ismeretlen \bar{h}_3, I és \bar{h}_3, II . Mivel azonban \bar{h}_3, I és \bar{h}_3, II rögzített összetétel (x_3, I és x_3, II) és nyomás (P_3) mellett csakis T_3 függvénye, alkalmas számítási módszerrel (gyakorlatilag iterációval) a keresett T_3 hőmérséklet meghatározható.

4. A 8. ábrán ellenáramú hőcserélő technológiai folyamatábráját tüntettük fel. Mivel összetételváltozás

egy-egy áramban nem adódik, tekintjük egy komponensűnek mindkét áramot. A hőcserélő egység szabadsági foka ezek szerint:

$$F = 2 \cdot 4 + 3 = 11$$

A 13 leíró adatból rögzítsük a nyomást és hőmérsékletet valamennyi nyíláson, valamint L_1, L_2 és L_3 mennyiségét. Ez utóbbi rögzítése (ti. $L_1 = L_3$) fejezi ki azt a tényt, hogy az 1. ponton belépő áram zárt úton jut a 3. kilépő pontra.

Ilyenformán meghatározandó L_4 , valamint Q , a hőcserélő hővesztése.

A bruttó anyagmérlegből:

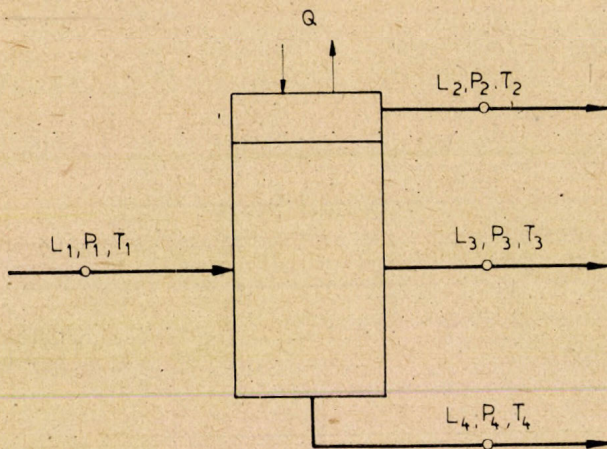
$$L_1 + L_2 - L_3 = L_4$$

Az entalpiamérleg:

$$Q + L_1 h_1 + L_2 h_2 = L_3 h_3 + L_4 h_4$$

⁷ Erdey—Grúz loc. cit. 260 l.

Mivel rögzített nyomáson $h = f(T)$, a hőcserélő hővesztése minden nehézség nélkül számítható.



9. ábra

5. A 9. ábrán olyan lepárló oszlopot rajzoltunk fel, amely három terméket szolgáltat, adiabatikusan működik, tehát hőcserélést csak a berendezés e célt szolgáló részében a fejtermékkondenzátorban bonyolít le. Tekintsünk el attól, hogy a betáplálás és a termékek összetétele eltér, illetőleg ezt az eltérést csupán a termékek fajlagos entalpiájának adekvát megválasztásával vegyük szóba. Ebből következik, hogy a komponensek mérvadó száma $m = 1$, tehát a műveleti egység szabadsági foka ugyanaz mint az előző esetben. Ha a 13 leíró adatból ugyanazokat rögzítjük mint az imént, a fejtermékkondenzátor hőforgalmának számítására a következő egyenleteket használhatjuk:

$$L_1 = L_2 + L_3 + L_4$$

$$Q + L_1 h_1 = L_2 h_2 + L_3 h_3 + L_4 h_4$$

Nem célunk, hogy az entalpiamérlegek számításának módszereit itt ismertessük s bemutassuk a mérlegek eredményét közlő táblázatok és rajzok (az ún. energiaforgalmi diagramok) szokásos alakjait. A részletekre vonatkozóan az olvasó hasznos útmutatásokat találhat a tömegmérlegekkel kapcsolatban már jelzett szakirodalomban [1—4].

Stacionárius működésű műveleti egységek

Foglaljuk össze még egyszer a folyamatosüzemű műveleti egységekről mondottakat. A tömegmegmaradás és az energiamegmaradás (I. főtétel) elvét folyamatosüzemű műveleti egységre (5. ábra) a következő egyenletrendszer fejezi ki:

$$\sum_{i=1}^n L_{ij} = 0 \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

$$Q = H_i(P_i, T_i, L_{ij})$$

Az egyenletrendszer egyenleteinek száma látványlag: $m + 1$; az egyenletrendszer változójának száma: $n(m + 2) + 1$.

Így tehát az egyenletrendszer határozatlan és csak akkor válik megoldhatóvá ha: $n(m + 2) + 1 - (m + 1)$,

$$F = 2n + (n - 1)m \quad (8)$$

számu tetszés szerinti változójának értékét rögzítjük. Az egyenletrendszernek — illetőleg annak a folyamatosüzemű műveleti egységnek, amelynek működését az egyenletrendszer írja le — ezek szerint $2n + (n - 1)m$ szabadsági foka van. Ha az F számú tetszés szerinti változó (technológiai paraméter) értékét úgy rögzítjük, hogy valamennyi az időben változatlan legyen, vagyis:

$$\frac{dI_k}{d\tau} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, F \quad (14)$$

ahol I_k tetszés szerinti változót (technológiai paramétert) jelent, akkor az összes többi is az időben változatlan marad. Az olyan folyamatosüzemű műveleti egységet, amelynek valamennyi technológiai paramétere az időben változatlan — stacionáriusnak nevezzük. Valamely műveleti egység stacionárius működésének szükséges és elégséges feltételeit (14) fejezi ki.

Kézenfekvő dolog, hogy stacionárius üzem teljesen automatikus vezérléséhez annyi szabályozó berendezés szükséges, ahány feltétele van a stacionárius működésnek, vagyis amennyi a üzem szabadsági foka. Ezzel feleletet is adtunk a közlemény elején feltett harmadik kérdésre.

A legutóbbi időig az a felfogás uralkodott a vegyészmérnöki gyakorlatban, hogy a stacionárius működésű üzemek technológiailag a legkedvezőbbek. Ez a felfogás napjainkban megváltozott. A helyzet ugyanis az, hogy egyes paraméterek tőlünk független változása (pl. nyersanyag minősége) a nem szabályozott paraméterek (pl. a végtermék minősége) változását hozzák magukkal. Az ilyen műveleti egység kvázistacionárius, azaz működésének időbeli változása lassú lesz, tehát nem túl hosszú időperiodusban belül működését stacionáriusnak tekinthetjük. Eredeti harmadik kérdésünk ezért a következőképpen módosul:

Hány helyen kell egy műveleti egységet úgy szabályozni, hogy az egyes paraméterek elkerülhetetlen változásait figyelembe véve, mindig az aktuális helyzetnek megfelelő, gazdaságossági szempontból optimális technológiai rendszerben működjék.

Erre a kérdésre egy későbbi, a gazdaságossági mérlegekkel foglalkozó közleményünkben fogunk visszatérni.

IRODALOM

- [1] Hougen—Watson—Ragatz: *Chemical Process Principles*. I. kötet.
- [2] Cremer—Davies: *Chemical Engineering Practice* I. kötet.
- [3] Preisich: *Vegyészetek Zsebkönyve*. Budapest, Műszaki Kiadó. 1959. 504. lap.
- [4] Benedek: *A kémiai technológiai számítások fizikokémiai alapjai* I. kötet.
- [5] Erdey—Grúz Tibor: *A Fizikai kémia alapjai*. Műszaki Könyvkiadó. 1959. 86. lap.