



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar
Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

Szerkesztette:
SIMÁNDI BÉLA

Írta:
CSÉFALVAY EDIT, DEÁK ANDRÁS, FARKAS TIVADAR,
HANÁK LÁSZLÓ, MIKA LÁSZLÓ TAMÁS, MIZSEY PÉTER,
SAWINSKY JÁNOS, SIMÁNDI BÉLA,
SZÁNYA TIBOR, SZÉKELY EDIT, VÁGÓ EMESE

Lektorálta:
VATAI GYULA

VEGYIPARI MŰVELETEK II.

Anyagátadó műveletek és kémiai reaktorok

Egyetemi tananyag

2. javított kiadás

2012



COPYRIGHT: © 2011-2016, Dr. Cséfalvay Edit, Dr. Deák András, Dr. Farkas Tivadar, Dr. Hanák László, Dr. Mika László Tamás, Dr. Mizsey Péter, Dr. Sawinsky János, Dr. Simándi Béla, Dr. Szánya Tibor, Dr. Székely Edit, Dr. Vágó Emese, BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

LEKTORÁLTA: Dr. Vatai Gyula, Budapesti Corvinus Egyetem

ÁBRÁK: Csépany Péter, Farkas Tivadar

ANIMÁCIÓK: Székely Edit, Tokai Zsolt, Utczás Margita

SZÁMÍTÓGÉPES SZERKESZTÉS: Bánsághi György

Creative Commons NonCommercial-NoDerivs 3.0 (CC BY-NC-ND 3.0)

A szerző nevének feltüntetése mellett nem kereskedelmi céllal szabadon másolható, terjeszthető, megjelentethető és előadható, de nem módosítható.

TÁMOGATÁS:

Készült a TÁMOP-4.1.2-08/2/A/KMR-2009-0028 számú, „Multidiszciplináris, modulrendszerű, digitális tananyagfejlesztés a vegyészmérnöki, biomérnöki és vegyész alapképzésben” című projekt keretében.



ISBN 978-963-279-487-7

KÉSZÜLT: a [Typotex Kiadó](#) gondozásában

FELELŐS VEZETŐ: Votisky Zsuzsa

KULCSSZAVAK:

vegyipari műveletek, anyag- és komponensátadási műveletek, molekuláris diffúzió fluidumokban, anyagátadás, fizikai abszorpció, deszorpció, desztilláció, rektifikálás, extrakció, adszorpció, ioncsere, kristályosítás, membránszeparációs műveletek, kémiai reaktorok, reakció kinetika, tartózkodási-idő eloszlás, konverzió nemideális reaktorban, katalitikus felületi reakciók, katalitikus reaktorok; gáz-folyadék reakciók, folyadék-folyadék reakciók, gáz-folyadék reaktorok; reakciók szuperkritikus szén-dioxidban, szuperkritikus vizes oxidáció; kísérlettervezés, kémiai reaktorok kísérleti optimalizálása

ÖSSZEFOGLALÁS:

A Vegyipari műveletek II. tananyag két fő részből áll. Az első részben (1.1–1.10 fejezetek) először az anyagátadás alapjait tárgyaljuk, azután részletesen bemutatjuk a vegyiparban és rokon iparágakban gyakran előforduló anyagátadó műveleteket: abszorpció, desztilláció, extrakció, szárítás, adszorpció, ioncsere, kristályosítás, membránszeparációs műveletek. A második rész (2.1–2.8 fejezetek) célja a kémiai reaktorok általános ismertetése: ideális reaktormodellek, konverzió nem ideális reaktorokban, gáz-szilárd reakciók, gáz-folyadék és folyadék-folyadék reakciók, reakciók szuperkritikus oldószerben. Bemutatjuk, hogy a heterogén reaktoroknál a komponensátadás és a kémiai reakció együtt határozzák meg a folyamat sebességét. Nagy súlyt fektettünk a gyakorlati használhatóságra ezért mindegyik műveletnél számos példát soroltunk fel, ahol az adott műveletet használják. Számítási példákkal mutattuk be az összefüggések, alapegyenletek használatát. Külön fejezetben összefoglaltuk a kísérlettervezés alapjait, ami a laboratóriumi vagy félüzemi kísérletezést hatékonyabbá teszi. Végül kidolgozott tervezési feladatokkal szemléltettük, hogyan lehet a különböző műveleteknél tanult számítási módszereket egy komplex feladat megoldásában felhasználni. A munka célja könnyen hozzáférhető digitális tananyag készítése volt, így az anyag megértését az írott szöveg mellett szemléltető ábrák, animációk és videók segítik.

1. ANYAGÁTADÓ MŰVELETEK ÉS KÉMIAI REAKTOROK

Előszó

A vegyészmérnöki tudomány meghatározó része a művelettan, amely a különböző gyártásokban, technológiákban fellelhető azonos jellegű folyamatoknak, a készülékek és berendezések működésének általános elemzése. Kezdetben a különböző technológiák egymástól külön fejlődtek, és csak viszonylag később ismerték fel, hogy a különböző iparágakban használt műveleteket (aprítás, keverés, szűrés, szárítás, bepárlás, desztilláció, extrakció, kristályosítás stb.) általánosan, az egyes iparágaktól függetlenül célszerű vizsgálni. Az első általánosítást Lunge fogalmazta meg (G. Lunge, ETH Zürich, 1893). Az elgondolást részletesebben Little fejtette ki (A. D. Little, M.I.T. Massachusetts, 1915). Bevezette a műveleti egység (unit operations) fogalmát. A XX. század első felében a vegyipari művelettan, illetve általánosabban a vegyészmérnöki tudomány (chemical engineering) tanítására számos egyetemen önálló tanszéket vagy intézetet hoztak létre.

Magyarországon az önálló műveleti tárgy oktatása 1948-ban kezdődött. A Budapesti Műszaki Egyetemen (BME) Sárkány György tanár úr szervezte meg az új tárgy oktatását a szakonkénti bontásban: a szervetlen kémiai szakon (ez a szak Veszprémben mint önálló egyetem működött tovább) László Antal; a szerves kémia szakon Tettamanti Károly és Sárkány György tartották az első években az előadásokat. Az első művelettani jegyzeteket Sárkány György, Csapó György és Kardos László írták. Ők évtizedekre meghatározták a műveleti tárgyak tematikáját és módszertanát. Tettamanti Károly professzor vezetésével létrejött a „műegyetemi iskola”, amelynek rövid idő múlva versenytársa lett a László Antal professzor vezetésével létrehozott „veszprémi iskola”. A két iskola és tudományos műhely napjainkig meghatározza a vegyipari művelettan oktatását, kutatását és fejlesztését.

A Budapesti Műszaki Egyetemen az Oktatásügyi Minisztérium 1952-ben „Vegyipari Műveletek és Gépek” néven új tanszéket hozott létre, amelynek megszervezésére Sárkány György kapott megbízást. A tanszék első professzora Tettamanti Károly lett. A tárgy gyakorlati bemutatásához szükséges félüzemi laboratórium megtervezéséhez és felépítéséhez M. G. Jefimovot, a Moszkvai Vegyipari Gépészeti Főiskola tanárát hívták meg. Mivel 1966-ban megalakult az önálló Vegyipari Géptan Tanszék, a megmaradó rész neve „Vegyipari Műveletek Tanszék” lett. Az első tíz évben a tanszék alapító oktatói, Tettamanti Károly, Sárkány György, Földes Péter, Hajdú Hajnalka, Manczinger József, Sawinsky János, Pekovits László kidolgozták a 3 féléves Vegyipari műveletek tárgy elméleti és gyakorlati tananyagát. A művelettani kutatásokkal (desztilláció, extrakció, abszorpció, fázis-egyensúlyok vizsgálata, új készülékek fejlesztése) számos területen nemzetközi szintű eredményeket értek el. A második generáció, Havas Géza, Hunek József, Molnár Erika, Kemény Sándor, Borus Andor, Radnai György, Rezessy Gábor jelentősen hozzájárultak a képzés gyakorlati jellegének erősítéséhez. Új kutatási eredményeik bekerültek a tananyagba, a kísérleti berendezésekből új hallgatói mérések születtek. Az 1990-es években a korszerű, egységes szemléletű művelettani oktatás fejlesztésében kiemelkedő szerepe Fonyó Zsolt professzornak volt. Az elmúlt két évtizedben a tanszéki kutatások számos új, korszerű témakörrel bővültek: extraktív, azeotróp és reaktív desztilláció; hibrid eljárások; műveletek szuperkritikus oldószerekkel; membránszeparációs műveletek. A romló gazdasági feltételek miatt a BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Karán szükségessé vált a szervezeti egységek összevonása, amelynek keretében a Vegyipari Műveletek és a Kémiai Technológia Tanszékek egyesülésével 2007-ben létrejött a Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék, amelynek egyik fő feladata a vegyipari műveletek tanítása.

A Vegyipari műveletek II. tananyag a vegyészmérnöki, biomérnöki és vegyész alapképzésben részt vevő hallgatók számára készült. Emellett a környezetmérnöki, élelmiszer-mérnöki, vegyipari gépészmérnöki, műszaki-menedzser és rokon területek hallgatói számára is ajánljuk. Bízunk benne, hogy a vegyiparban és rokon iparágakban dolgozó szakemberek is használják majd ezt az anyagot ismereteik felfrissítésére, vagy az új (korábban még nem tanított) műveletek megismerésére. Hangsúlyozzuk, hogy ez a tananyag nem kézikönyv értékű, nem törekedhettünk a készülékek tervezésénél használt összefüggések teljes körű bemutatására. A fejezetek végén közölt irodalomjegyzék segít a különböző műveletek részletesebb megismerésében. A tananyag készítésénél figyelembe vettük a kétfokozatú (bolognai) képzés sajátosságait. Csak a megértéshez szükséges alapvető matematikai, fizikai, kémiai, fizikai-kémiai és géptan ismereteket tételezzük fel. Természetszerűleg építettünk a

Vegyipari műveletek I. tárgyban tanultakra, de tekintettel voltunk a hallgatók befogadóképességére is. A tananyag tartalmazza az elméleti anyagot, a számolási gyakorlatok anyagát, és megalapozza a két féléves laboratóriumi gyakorlatok vonatkozó méréseit is. A Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar sajátos képzési programjának megfelelően az emeltszintű vizsga (válogatott fejezetek) anyagát is beillesztettük. A mesterképzésben ismétléshez, vagy a szintetizáló tárgyak (pl. Folyamatok tervezése és irányítása, Környezetbarát és katalitikus folyamatok) alapjaként használható.

A Vegyipari műveletek tananyag két fő részből áll. Az első részben (1.1–1.10 fejezetek) tárgyaljuk az anyagátadó műveleteket: abszorpció, desztilláció, extrakció, szárítás, adszorpció, ioncsere, kristályosítás, membránseparációs műveletek. A második rész (2.1–2.8 fejezetek) célja a kémiai reaktorok általános ismertetése: ideális reaktormodellek, konverzió nem ideális reaktorokban, gáz-szilárd reakciók, gáz-folyadék és folyadék-folyadék reakciók, reakciók szuperkritikus oldószerekben. A két rész ritkán kerül egy közös könyvbe, holott az összetartozásuk nyilvánvaló. A heterogén reaktoroknál a komponensátadás és a kémiai reakció együtt határozzák meg a folyamat eredményességét, így a két rész összetartozása jól szemléltethető.

Az egyes fejezetekben először az alapl művelet leírását (definícióját) adjuk meg, azután, a mérleg-egyenletekből kiindulva, bemutatjuk az adott művelet számítási módszereit. Ezt követi a jellemző készülékek leírása, végül a fontosabb készülékek méretezésének ismertetése. Nagy súlyt fektettünk a gyakorlati ismeretek bővítésére. Mindegyik műveletnél számos példát soroltunk fel, ahol az adott műveletet használják. Számítási példákkal mutattuk be az összefüggések, alapegyenletek használatát. Végül kidolgozott tervezési feladatokkal szemléltettük, hogyan lehet a különböző műveleteknél tanult számítási módszereket egy komplex feladat megoldásában felhasználni. A munka célja könnyen hozzáférhető digitális tananyag készítése volt, így az anyag megértését az írott szöveg mellett szemléltető ábrák, animációk és videók segítik.

A szerzői munkaközösség egy TÁMOP-projekt támogatásával alakult meg. Többségét a BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Karán a Vegyipari műveletek tárgyat oktató kollégák alkotják (őket nevezhetjük a harmadik és negyedik generációnak). Tudatosan vállaljuk tehát, hogy a tananyag a „műegyetemi iskola” hagyományait folytatja. A tananyag írásánál felhasználtuk a tanszék gondozásában korábban megjelent szakkönyveket, tankönyveket és egyetemi jegyzeteket és a hallgatók véleményét. Ugyanakkor a munkában részt vettek a Pannon Egyetem (Veszprém) művelettanban és a finomkémiai elválasztások területén elismert tanárai, Szánya Tibor és Hanák László. Az Eötvös Loránd Tudományegyetemről Mika László Tamás (aki szintén a Veszprémi Egyetemen szerzett oklevelet) működött közre 3 fejezet megírásával. Ebben a munkában tehát a „veszprémi iskola” is jelentős súllyal jelenik meg, ami a tananyagfejlesztés szempontjából nagyon hasznos.

Megköszönjük Dr. Vatai Gyula professzornak, a tananyag lektorának, hogy a terjedelmes kéziratot gondosan átnézte, és sok hasznos tanáccsal segítette a munkánkat.

Budapest, 2011. május

Simándi Béla

Jelölések

A jelölések elkészítését nehezítette, hogy az anyagátadó műveletek és reaktorok most egy egységet képeznek. Mivel egy-egy szakmai részterületen már elfogadott jelölések vannak, nem tudtuk elkerülni, hogy egy betű több fogalmat is jelöljön. Ilyenkor indexeléssel különböztettük meg a különböző fogalmakat. Arra törekedtünk, hogy az egész tananyagban legyen egy általános jelölésjegyzéke, amelyet műveletenként kiegészítünk, ha szükséges.

a	fajlagos felület (m^2/m^3),
a	hőfokvezetési tényező (m^2/s),
a_D	fajlagos anyagátadó felület (m^2/m^3),
a_H	fajlagos hőátadó felület (m^2/m^3),
a_j	aktivitás (-),
A	felület (m^2),
A	abszorpciós tényező (-),
A_h	hőátadó felület (m^2),
A, B, C	kémiai komponensek (általánosan i és j),
A_j, B_j, C_j	a j -edik komponens Antoine-konstansai,
c	koncentráció (mol/m^3), (komponensenként indexelés. c_A, c_i, c_j stb.),
c_p	fajhő ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$),
C	dimenziómentes koncentráció (-),
C	komponensek száma,
C_p	moláris fajhő ($\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$),
d	átmérő (m),
d_k	keverőátmérő (m),
d_p	szemcseméret (mm vagy m),
d_0	jellemző szemcseméret (mm vagy m),
d_{SV}	„felületi-térfogati” átlagos átmérő (mm vagy m),
D	készülékátmérő, csőátmérő (m),
D	desztillátum (fejtermék) mennyisége vagy mólárama (mol vagy mol/s),
D_o	oszlopátmérő (m),
D_{AB}	az A komponens diffúziós együtthatója a B közegben (m^2/s),
D_{eff}	effektív diffúziós tényező (m^2/s),
D_{ax}	axiális diffúziós tényező (m^2/s),

E	Arrhenius-féle aktiválási energia (J/mol),
E	extrakciós tényező (-),
$E(d)$	a szemcseméret sűrűségfüggvénye (1/mm),
$E(t)$	a tartózkodási idő sűrűségfüggvénye (1/s),
f	súrlódási tényező (-)
f_j	fugacitás (Pa),
F	a rendszer szabadsági foka (-),
F	erő (N),
F	Faraday-állandó (96485 J/(mol·V)),
F	betáplálás mólárama (mol/s),
F	gőzterhelési faktor (Pa ^{1/2}),
$F(d)$	a szemcseméret eloszlásfüggvénye (-),
$F(t)$	a tartózkodási idő eloszlásfüggvénye (-),
G	gázáram (mol/s),
G	moláris szabadentalpia (J/mol),
ΔG^0	standard szabadentalpia változása (J/mol),
$G(s)$	átviteli függvény (-),
h	hosszúság- (magasság-) koordináta (m),
h	hőátbocsátási tényező (W/(m ² K)),
h	entalpia (J),
H	Henry-állandó (Pa),
H	magasság (pl. oszlopoknál) (m),
H	levegő abszolút nedvességtartalma (kg/kg),
H_j	a j -edik komponens moláris entalpiája (J/mol),
ΔH	fázisállapot-változással járó entalpiaváltozás (pl. párolgáshő, szublimációs hő) (J/mol),
ΔH_R	reakcióentalpia ($\Delta_R H$ számítással kapott reakcióentalpia) (J/mol),
$\Delta_f H^0$	standard képződéshő (J/mol),
$H(t)$	egységugrás függvény (-),
HETP	egy elméleti tányérnak megfelelő magasság (m),
HTU	átviteli egység magasság (x vagy y indexszel!) (m),
j_D	anyagátadási j -faktor (-),
j_H	hőátadási j -faktor (-)
J	komponens áramsűrűség, fluxus (mol/(m ² s)), (komponensenként indexelés J_A , J_j stb.),

J_m	komponens-áramsűrűség (kg/(m ² s),
J_v	komponens-áramsűrűség (m ³ /(m ² s),
J^*	dimenziómentes fluxus (-),
k	Boltzmann-állandó (1,38·10 ⁻²³ J/K),
k	reakciósebességi együttható (függ a reakció rendjétől),
k_∞	preexponenciális tényező (függ a reakció rendjétől),
K	anyagátbocsátási tényező (G vagy L ; x vagy y indexszel!) (m/s),
K	egyensúlyi állandó (indexelés a koncentrációval c , y stb.),
K	komponensek száma (-),
l	hosszkoordináta (m),
L	készülék (cső) hossza (m),
L	moláris folyadékmennyiség vagy folyadékáram (mol vagy mol/s),
m	tömeg (kg),
m	elméleti fokozatszám vagy tényérszám sorszáma (-),
m	megoszlási hányados (általánosan $y = mx$) (-),
m	reakció rendje (komponensenkénti részrend m_j, m_i stb.) (-),
\dot{m}	tömegáram (kg/s),
M	móltömeg (g/mol),
M_n	n -edik kezdeti momentum (-),
n	anyagmennyiség (mol), (komponensenként indexelés n_A, n_j stb.),
n	elméleti fokozatszám vagy tényérszám sorszáma (-),
\dot{n}	móláram (mol/s), (komponensenként indexelés \dot{n}_A, \dot{n}_j stb.),
N	elméleti fokozatok (tényérok) száma, cellaszám (-),
N	reakciók száma (-),
NTU	az átviteli egységek száma (x vagy y indexszel!) (-),
p	nyomás (Pa),
p_j^0	a j -edik komponens egyensúlyi gőznyomása (tenzió) (Pa, régebben Hgmm),
p_j	a j -edik komponens parciális nyomása (Pa),
P	nyomás (Pa vagy bar),
P	fázisok száma,
q	a betáplálás hőállapotára jellemző tényező (-),
Q	hőmennyiség (J),

\dot{Q}	hőáram (W),
r	sugárirányú koordináta (m),
r	intenzív (fajlagos) reakciósebesség (mol/(m ³ s)),
R	kör vagy henger vagy gömb sugara (m),
R	refluxarány (-),
R	áramlási ellenállás (1/m),
R	moláris gázállandó (egyéb jelölése \mathfrak{R}) (8,314 J/(mol K)),
R	korrelációs koefficiens (-),
s	a Laplace-transzformáció változója (1/s),
S	szelektivitás (-),
S	moláris entrópia (J/(mol K)),
t	idő (s),
t^*	időállandó (s),
$t_{1/2}$	felezési idő (s),
\bar{t}	átlagos tartózkodási idő (s),
T	hőmérséklet (°C vagy K),
\bar{T}_h	a hűtőközeg (fűtőközeg) átlagos hőmérséklete (K),
ΔT_{ad}	maximális adiabatikus hőmérséklet-változás (K),
TMP	transzmembránnnyomás (Pa),
u	lokális áramlási sebesség (m/s),
v	átlagos áramlási sebesség (m/s),
\vec{v}	sebességvektor (m/s),
V	térfogat (m ³),
V	moláris gőzmenyiség vagy gőzáram (mol vagy mol/s),
V_i, V_j	moláris térfogat (m ³ /mol),
\dot{V}	térfogatáram (m ³ /s),
W	maradék mennyisége, mólárama (mol vagy mol/s),
z	töltésszám (-),
z	helykoordináta (m),
Z	dimenziómentes helykoordináta (hosszkoordináta) (-),
x	koncentráció (móltört) (-), (folyadékfázisban, raffinátumban),
X	dimenziómentes koncentráció (-),
X	konverzió (-),
X_n	nedves anyagra vonatkoztatott nedvességtartalom (kg/kg),

X_{sz}	száraz anyagra vonatkoztatott nedvességtartalom (kg/kg),
y	koncentráció (móltört) (-), (gőzfázisban, gázfázisban, extraktumban),
y^*	egyensúlyi koncentráció (móltört) (-),
Y	dimenziómentes koncentráció (-),
Y	hozam (-),

Görög betűk

α	hőátadási tényező (W/(m ² K)),
α_{ij}	relatív illékonyság (-),
α_{ij}	relatív szelektivitás (-),
α_{ij}	szeparációs faktor (-),
β	szelektivitás (-),
β	anyagátadási tényező (indexelés x és y vagy L és G) (m/s),
γ	aktivitási koefficiens (-),
γ	recirkulációs tényező (-),
γ	felületi feszültség (N/m),
η	hatásfok (-),
η	dinamikai viszkozitás (Pas),
η_j	ion-elektrokémiai potenciál (J/mol),
δ	filmvastagság (m),
δ	halomsűrűség (kg/m ³),
$\delta(t)$	egységimpulzus (Dirac-delta) függvény (1/s),
ε	a töltet fajlagos hézagterfogatja (m ³ /m ³),
ε	porozitás (m ³ /m ³),
ε_L	folyadék hold-up (m ³ /m ³),
φ	relatív telítettség (-),
φ	relatív nedvességtartalom (-),
φ_i, φ_j	fugacitási koefficiens (-),
Φ	nedvesítési tényező (-),
λ	hullámhossz (m),
λ	hővezetési tényező (W/(m·K)),
λ	moláris párolgáshő (J/mol),

μ	hűtési paraméter (-),
μ_j	a j -edik komponens kémiai potenciálja (J/mol),
μ_j^0	standard kémiai potenciál (J/mol),
μ_n	n -edik centrális momentum (-),
ν_j	a j -edik komponens sztöchiometriai együtthatója (-),
ξ	extenzív reakciókoordináta (mol),
$\dot{\xi}$	reakciósebesség (mol/s),
ρ	sűrűség (kg/m ³),
ρ_M	moláris sűrűség (mol/m ³),
σ^2	szórásnégyzet (-),
\mathcal{G}	dimenziómentes idő (-),
Θ	relatív felületi borítottság (-),
τ	csúsztató feszültség (Pa),
τ	tortuozitás (m/m),
τ	időállandó (relaxációs idő) (s),
τ_R	reakció időállandója (s),
ν	kinematikai viszkozitás (gyakran ν) (m ² /s),
ω	acentricitási tényező (-),

Alsó indexek

ax	axiális,
átl	átlagos,
b	belső (bulk),
be	belépő,
C	kritikus,
D	desztillátum,
e	egyensúlyi,
E	extraktum,
f	szuperkritikus fluidum,
f	képződési,
F	betáplálás,
G	gáz vagy gőz,
i	fázishatár (interface),

infl	infexió,
irr	irreverzibilis,
k	közbülső hely az oszlopban,
ki	kilépő,
konv	konvektív szállítás,
L	folyadék,
max	maximális érték,
mért	mért érték,
min	minimális érték,
opt	optimális érték,
p	részecske,
r	redukált (a kritikus értékkel osztott),
R	reakció,
R	raffinátum,
S	szilárd vázanyag,
sz	szakaszos,
V	gőz,
W	maradék,
x	folyadékfázis, raffinátum,
y	gázfázis, gőzfázis, extraktum,
0	kezdeti érték,
∞	végtelen idejű (helyű) érték,

Felső indexek

0	standard állapot,
F	betáplálás,
G	gáz,
L	folyadék,
V	gőz,
*	egyensúlyi összetétel.

Tartalomjegyzék

1. ANYAGÁTADÓ MŰVELETEK ÉS KÉMIAI REAKTOROK.....	3
Előszó.....	4
Jelölések.....	6
Görög betűk.....	10
Alsó indexek.....	11
Felső indexek.....	12
Tartalomjegyzék.....	13
1.1. Az anyagátadás elméleti alapjai (Simándi Béla).....	19
1.1.1. Az anyagátadó műveletek csoportosítása.....	19
1.1.2. Molekuláris diffúzió fluidumokban.....	21
1.1.3. Anyagátadás szállítással (konvektív anyagtranszport).....	27
1.1.4. Az anyagátadási tényező kísérleti meghatározása.....	31
1.1.5. Az anyagátadási műveletek általános leírása.....	33
Ellenőrző kérdések.....	48
Felhasznált irodalom.....	49
1.2. Abszorpció (Mizsey Péter).....	50
1.2.1. Komponensátadás gáz–folyadék rendszerben.....	51
1.2.2. Az abszorpció műveleti leírása.....	54
1.2.3. Abszorberek.....	65
1.2.4. Az abszorbens regenerálása, deszorpció.....	69
Ellenőrző kérdések.....	70
Felhasznált irodalom.....	71
1.3. Desztilláció (Mizsey Péter, Simándi Béla, Székely Edit).....	72
1.3.1. Gőz–folyadék egyensúlyok, mérésük, modellezésük.....	72
1.3.2. A desztilláció és rektifikálás alapjai.....	83
1.3.3. A rektifikálás berendezései, tányéros és töltetes oszlopok.....	115
1.3.4. Különleges desztillációs eljárások.....	131
1.3.5. Energiafelhasználás, energiaintegráció.....	140
1.3.6. Kőolaj-feldolgozás.....	151
Ellenőrző kérdések.....	157
Felhasznált irodalom.....	159
1.4. Extrakció (Simándi Béla, Székely Edit).....	161
1.4.1. Folyadék–folyadék extrakció.....	161
1.4.2. Szilárd–folyadék extrakció.....	195

1.4.3. Szuperkritikus extrakció	218
Ellenőrző kérdések	233
Felhasznált irodalom:	234
1.5. Szárítás (Mika László Tamás).....	237
1.5.1. A szárítással kapcsolatos alapfogalmak.....	237
1.5.2. A nedves levegő tulajdonságai	238
1.5.3. Entalpia–összetétel-diagramok	243
1.5.4. A nedves anyagok jellemzése	246
1.5.5. Nedvességvándorlás a nedves anyagokban	252
1.5.6. Szárítási módszerek	256
1.5.7. A szárítás mérlegegyenletei.....	258
1.5.8. A szárítás kinetikája.....	268
1.5.9. A száradási idő.....	271
1.5.10. A szárítás változatai.....	272
1.5.11. Szárítóberendezések	275
1.5.12. Speciális szárítási feladatok.....	291
Ellenőrző kérdések	292
Felhasznált irodalom.....	294
1.6. Adszorpció (Szánya Tibor)	295
1.6.1. Bevezetés	295
1.6.2. Adszorpciós jelenségek	295
1.6.3. Adszorpciós egyensúlyok	296
1.6.4. Adszorpciós folyamatok sebessége	298
1.6.5. Adsorbensek.....	298
1.6.6. Adsorbensvizsgálatok	305
1.6.7. Az adszorpciós műveletek csoportosítása.....	310
Ellenőrző kérdések	351
Számítási feladatok.....	351
Jelölések	357
Felhasznált irodalom.....	359
1.7. Ioncsere (Hanák László)	361
1.7.1. Bevezetés	361
1.7.2. Ioncserélő anyagok	361
1.7.3. Az ioncsere-folyamattal kapcsolatos egyensúlyok	366
1.7.4. Ioncsere másodlagos folyamatokkal kísérve	388
1.7.5. Az ioncsere-folyamatok kinetikája	389
1.7.6. Ioncsérés műveletek	394

1.7.7. Frontális ioncserés műveletek matematikai leírása	403
Ellenőrző kérdések	418
Számítási feladatok.....	418
Jelölések	426
Felhasznált irodalom.....	430
1.8. Kristályosítás (Mika László Tamás)	431
1.8.1. Anyagi halmazok	432
1.8.2. Oldhatóság	436
1.8.3. Fázisdiagramok–fázisegyensúly	438
1.8.4. A kristályosítás mechanizmusa és fázisai	446
1.8.5. A kristályosítás hőeffektusai.....	451
1.8.6. A kristályképződést befolyásoló tényezők	451
1.8.7. A kristályosítás hozama.....	452
1.8.8. Frakcionált kristályosítás	453
1.8.9. Szakaszos és folyamatos kristályosítás.....	455
1.8.10. Kristályosítóberendezések	458
1.8.11. Enantioseparáció kristályosítással	464
1.8.12. Olvadékból történő kristályosítás	468
1.8.13. Kristályosítóberendezés modellezése és tervezése	470
1.8.14. Gőzfázisból történő kristályosítás.....	472
Ellenőrző kérdések	474
Felhasznált irodalom.....	475
1.9. Membránszeparációs műveletek (Mizsey Péter, Cséfalvay Edit).....	476
1.9.1. Bevezetés	476
1.9.2. A membránok csoportosítása.....	477
1.9.3. Membránműveletek életciklusa	477
1.9.4. Membránszeparációval kapcsolatos alapfogalmak.....	478
1.9.5. Mikroszűrés	489
1.9.6. Ultraszűrés	492
1.9.7. Nanoszűrés.....	494
1.9.8. Fordított ozmózis	499
1.9.9. Pervaporáció	503
1.9.10. Gázszerparáció.....	520
1.9.11. Gőzpermeáció.....	522
1.9.12. Dialízis.....	522
1.9.13. Donnan-dialízis és diffúziós dialízis.....	524
1.9.14. Elektrodialízis, tüzelőanyag-cella.....	526

1.9.15. Membrándeztilláció	529
1.9.16. Folyadék membránok	530
1.9.17. Membránreaktorok, membrán bioreaktorok	533
Ellenőrző kérdések	535
Felhasznált irodalom.....	540
1.10. Számítások és tervezési gyakorlatok (Székely Edit, Vágó Emese, Farkas Tivadar)	542
1.10.1. Desztilláció	542
1.10.2. Abszorpció.....	586
1.10.3. Extrakció.....	595
1.10.4. Szárítás.....	605
1.10.5. Tervezési feladatok.....	608
Felhasznált irodalom.....	625
Függelék 1.10	626
2. KÉMIAI REAKTOROK	642
Előszó.....	643
Szakkönyvek	644
2.1. A reaktorszámítás fizikai-kémiai alapjai (Sawinsky János).....	646
2.1.1. Kémiai reakció és reakciósebesség.....	646
2.1.2. A reakciósebesség kísérleti meghatározása	656
2.1.3. Energiaváltozás a kémiai reakciókban.....	667
Ellenőrző kérdések	674
Online adatbázisok	675
Felhasznált irodalom.....	676
Függelék 2.1.	677
2.2. A reaktorok alaptípusai, ideális reaktorok (Sawinsky János, Simándi Béla, Deák András).....	684
2.2.1. Reaktorüzemeltetési módok.....	684
2.2.2. Szakaszos kevert tartályreaktor	694
2.2.3. Félfolyamatos kevert tartályreaktor	712
2.2.4. Folyamatos ideális kevert tartályreaktor.....	721
2.2.5. Csőreaktor.....	737
2.2.6. Gázfázisú reakció folyamatos izoterm-izobar reaktorban	746
Ellenőrző kérdések	750
Felhasznált irodalom.....	751
Függelék 2.2.	753
2.3. Konverzió nem-ideális reaktorokban (Sawinsky János, Simándi Béla).....	764
2.3.1. Tartózkodási-idő eloszlás	764
2.3.2. Áramlási modellek.....	772

2.3.3. A modellparaméterek meghatározása.....	787
2.3.4. A mikro- és makrokeveredés hatása a reaktor működésére.....	795
Ellenőrző kérdések	803
Felhasznált irodalom.....	804
Függelék F2.2	806
2.4. Gáz-szilárd reakciók (Mika László Tamás)	810
2.4.1. Nemkatalitikus gáz-szilárd reakciók.....	813
2.4.2. Katalitikus gáz-szilárd reakciók	818
2.4.3. A katalitikus felületi reakciók kinetikája.....	831
2.4.4. A komponens- és hőtranszport hatása a katalizátorfelület hőmérsékletére	849
2.4.5. A heterogén katalizátorok jellemzői	854
2.4.6. Heterogén katalitikus reaktorok.....	862
Ellenőrző kérdések	866
Felhasznált irodalom.....	868
2.5. Gáz-folyadék és folyadék-folyadék reakciók (Sawinsky János, Deák András, Simándi Béla)	869
2.5.1. Gáz-folyadék reakció.....	869
2.5.2. Gáz-folyadék reaktorok	886
2.5.3. Kémiai reakció folyadék – folyadék kétfázisú rendszerben	901
2.5.4. Folyadék – folyadék reaktorok	904
Ellenőrző kérdések	908
Felhasznált irodalom.....	909
2.6. Kémiai reakciók szuperkritikus oldószerekben (Székely Edit, Simándi Béla)	911
2.6.1. Fizikai-kémiai alapok	912
2.6.2. Reakciók „szuperkritikus” szén-dioxidban.....	918
2.6.3. Szuperkritikus vizes oxidáció	926
Ellenőrző kérdések	929
Felhasznált irodalom.....	930
2.7. Kémiai reaktorok kísérletes optimalizálása (Deák András)	932
2.7.1. 2^p típusú teljes faktoros kísérleti tervek.....	932
2.7.2. 2^{p-f} típusú részfaktortervek	938
2.7.3. A kísérletek menete	942
2.7.4. A válaszfelület módszere: Box és Wilson módszere az optimum megközelítésére	949
2.7.5. Másodfokú kísérleti tervek	954
2.7.6. A kísérlettervezés megvalósítása.....	960
Ellenőrző kérdések	962
Felhasznált irodalom.....	963
2.8. Számítások és tervezési gyakorlatok – Kémiai reaktorok (Székely Edit, Deák András)	965

2.8.1. Mintapéldák szakaszos kevert tartályreaktor számítására	965
2.8.2. Mintapéldák folyamatos kevert tartályreaktor számítására	983
2.8.3. Mintapéldák csőreaktor számítására.....	1008
2.8.4. Mintapéldák félfolyamatos reaktor számítására	1017
2.8.5. Mintapéldák különböző reaktortípusok kombinációjával.....	1018
2.8.6. Gyakorlófeladatok	1023
2.8.7. Tervezési feladatok.....	1026
Felhasznált irodalom.....	1065
Függelék 2.8. – Táblázatok.....	1066
Ábrák, animációk, videók, táblázatok jegyzéke.....	1068
Ábrák	1068
Animációk	1086
Videók	1086
Táblázatok	1086