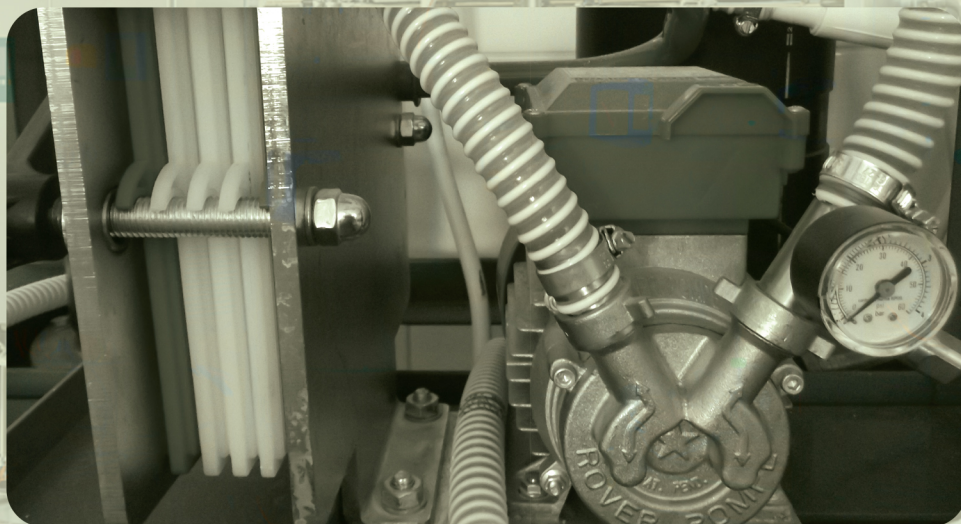




SAPIENTIA  
ERDÉLYI MAGYAR  
TUDOMÁNYEGYETEM  
CSÍKSZEREDAI KAR



SZÉP ALEXANDRU    ANDRÁS CSABA DEZSŐ    MOLNOS ÉVA

# TRANSZPORTFOLYAMATOK ÉS MŰVELETAN

## LABORATÓRIUMI ÚTMUTATÓ

*TRANSPORTFOLYAMATOK ÉS  
MŰVELETTAN  
LABORATÓRIUMI ÚTMUTATÓ*

SZÉP ALEXANDRU  
ANDRÁS CSABA DEZSŐ  
MOLNOS ÉVA



SAPIENTIA ERDÉLYI MAGYAR TUDOMÁNYEGYETEM  
CSÍKSZEREDAI KAR  
ÉLELMISZERTUDOMÁNYI TANSZÉK

# ***TRANSZPORTFOLYAMATOK ÉS MŰVELETTAN***

*Laboratóriumi útmutató*

SZÉP ALEXANDRU  
ANDRÁS CSABA DEZSŐ  
MOLNOS ÉVA

| Scientia Kiadó |  
| Kolozsvár · 2020 |

MEGVALÓSULT A MAGYAR KORMÁNY  
TÁMOGATÁSÁVAL



MINISZTERELNÖKSÉG  
NEMZETPOLITIKAI ÁLLAMTITKÁRSÁG



BETHLEN GÁBOR  
Alap

**Felelős kiadó:**

Kása Zoltán

**Lektor:**

Kmecz Ildikó (Budapest)

**Borítóterv:**

Tipotéka Kft.

A szakmai felelősséget teljes mértékben a szerkesztők, illetve a szerzők vállalják.

Első kiadás: 2020

© Scientia 2020

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítás, a nyilvános előadás, a rádió- és televízióadás, valamint a fordítás jogát, az egyes fejezeteket illetően is.

**Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României**

**SZÉP, ALEXANDRU**

**Transzportfolyamatok és művelettan : laboratóriumi útmutató / Szép Alexandru,**

András Csaba Dezső, Molnos Éva. - Cluj-Napoca : Scientia, 2020

Conține bibliografie

ISBN 978-606-975-035-3

I. András, Csaba

II. Molnos, Éva

# TARTALOM

---

<b>Bevezetés</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Általános tudnivalók</b> .....	<b>13</b>
1.1. Fizikai mennyiségek. Mértékegységek. Dimenzióanalízis .....	13
1.2. Számításokkal és ábrákkal kapcsolatos tudnivalók .....	20
1.3. A mérési feladatokkal kapcsolatos tudnivalók .....	21
1.4. A laboratóriumi gyakorlatok elvégzésének alapfeltételei .....	25
1.5. A jegyzőkönyv készítésével kapcsolatos tudnivalók .....	27
<b>2. Transzportfolyamatokkal kapcsolatos mérési gyakorlatok</b> .....	<b>29</b>
<b>Áramlási mérések</b> .....	<b>29</b>
2.1. Az áramlás jellegének gyakorlati vizsgálata. A Reynolds-szám és a kritikus Reynolds-szám meghatározása .....	29
2.2. A csőszűrlődési tényező gyakorlati meghatározása .....	32
2.3. A mérőperem jelleggörbéje .....	36
2.4. A csőhálózat áramlási ellenállásának gyakorlati meghatározása ...	41
2.5. A töltött és a fluidizációs réteg áramlási nyomásvesztésének gyakorlati vizsgálata .....	44
2.5.1. Töltött oszlop (száraz és nedves) nyomásvesztésének gyakorlati meghatározása .....	46
2.5.2. A fluidizációs töltet nyomásvesztésének mérése .....	50
2.6. Az ülepedési sebesség gyakorlati meghatározása .....	53
<b>Hőtranszportú mérési gyakorlatok</b> .....	<b>61</b>
2.7. A hővezetés hidrodinamikai modellezése .....	61
2.8. A kondenzációs hőátadási tényező gyakorlati meghatározása .....	65
<b>Komponenstranszportú mérési gyakorlatok</b> .....	<b>69</b>
2.9. Az anyagátadási együttható gyakorlati meghatározása forgó korong módszerrel .....	69
2.10. A komponensátadási tényező meghatározása lecsurgó filmes kolonnában .....	74
2.11. Az effektív diffúziós tényező gyakorlati meghatározása .....	80
<b>3. Műveletekkel kapcsolatos mérési gyakorlatok</b> .....	<b>85</b>
<b>Hidrodinamikai műveletek</b> .....	<b>85</b>
3.1. Keverőelemek hatékonyságának gyakorlati meghatározása .....	85
3.2. A szűrési állandók gyakorlati meghatározása vákuum- és nyomás alatti szűréskor .....	89
3.2.1. A szűrési egyenlet állandóinak gyakorlati meghatározása vákuumszűrés esetén .....	91
3.2.2. A szűrés állandóinak gyakorlati meghatározása présszűrővel ..	92

<b>Hőátadási műveletek</b> .....	<b>97</b>
3.3. Az instacionárius állapotú hőátadás gyakorlati vizsgálata .....	97
3.4. A stacionárius állapotú hőátbocsátás tanulmányozása cső a csőben típusú hőcserélőben .....	105
3.5. A csőköteges hőcserélő hőátbocsátási tényezőjének gyakorlati meghatározása .....	112
3.6. A hőátbocsátási tényező meghatározása lemezes hőcserélőben ...	115
<b>Komponensátadási műveletek</b> .....	<b>121</b>
3.7. Az abszorpció vizsgálata töltött oszlopú kolonnában .....	121
3.8. A szakaszos szabad konvekciós és hősugárzású szárítás kinetikai vizsgálata .....	128
3.8.1. A szabad konvekciós szárítás .....	130
3.8.2. A hősugárzású szárítás .....	132
3.9. A komponens-szétválasztás tanulmányozása egyszeri szakaszos desztillációs berendezésben .....	136
3.10. A kisózás gyakorlati tanulmányozása .....	140
<b>Mellékletek</b> .....	<b>147</b>
<b>Nomogramok</b> .....	<b>177</b>
<b>A mellékletek és nomogramok jegyzéke</b> .....	<b>193</b>
<b>Alkalmazott jelölések</b> .....	<b>195</b>
<b>Felhasznált irodalom</b> .....	<b>199</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>201</b>
<b>Rezumát</b> .....	<b>203</b>
<b>A szerzőkről</b> .....	<b>205</b>

# TABLE OF CONTENTS

---

<b>Introduction</b> .....	<b>11</b>
<b>1. General notions</b> .....	<b>13</b>
1.1. Physical quantities and their units. Dimensional analysis .....	13
1.2. Information on calculations and diagram construction .....	20
1.3. Information regarding the measurements .....	21
1.4. Prerequisites for admission in laboratory .....	25
1.5. Information on the writing of the laboratory work report .....	27
<b>2. Laboratory guide in Transport Phenomena</b> .....	<b>29</b>
<b>Momentum transfer measurements</b> .....	<b>29</b>
2.1. Experimental determination of the flow regime. Determination of the Reynolds number and the critical Reynolds number .....	29
2.2. Experimental determination of the Darcy friction factor .....	32
2.3. Calibration of diaphragms .....	36
2.4. Experimental determination of the friction loss due to pipe fittings ..	41
2.5. Experimental determination of pressure drop in fixed and fluidized bed .....	44
2.5.1. Experimental determination of pressure drop in dry and wet fixed bed .....	46
2.5.2. Experimental determination of pressure drop in fluidized bed .....	50
2.6. Experimental determination of settling velocity .....	53
<b>Heat transfer measurements</b> .....	<b>61</b>
2.7. Hydrodynamic modelling of heat transport .....	61
2.8. Experimental study of the heat transfer in condensation .....	65
<b>Laboratory work involving the mass transfer</b> .....	<b>69</b>
2.9. Determination of the component transfer coefficient by the rotary disk technique .....	69
2.10. Determination of the component transfer coefficient in the falling-film column .....	74
2.11. Experimental determination of the effective diffusion coefficient ..	80
<b>3. Unit operations laboratory work</b> .....	<b>85</b>
<b>Hydrodynamic operations</b> .....	<b>85</b>
3.1. Experimental determination of the efficiency of mechanical stirrers ..	85
3.2. Experimental determination of filtration constants .....	89
3.2.1. Experimental determination of filtration constants in vacuum filtration .....	91
3.2.2. Experimental determination of filtration constants in press filters .....	92



<b>Heat transfer operations</b> .....	<b>97</b>
3.3. Experimental study of the non-stationary heat transfer .....	97
3.4. Study of the steady-state heat transfer in tubular heat exchanger ...	105
3.5. Experimental determination of the overall heat transfer coefficient in shell and tube exchangers .....	112
3.6. Experimental determination of the overall heat transfer coefficient in a plate heat exchanger .....	115
<b>Mass transfer operations</b> .....	<b>121</b>
3.7. The study of absorption in a fixed bed column .....	121
3.8. Kinetics of drying .....	128
3.8.1. Free convective drying .....	130
3.8.2. Infrared drying .....	132
3.9. Experimental study of the simple distillation .....	136
3.10. Experimental study of sodium sulphate salting from solutions ..	140
<b>Appendices</b> .....	<b>147</b>
<b>Nomograms</b> .....	<b>177</b>
<b>Contents of appendices and nomograms</b> .....	<b>193</b>
<b>Notations</b> .....	<b>195</b>
<b>Bibliography</b> .....	<b>199</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>201</b>
<b>Rezumat</b> .....	<b>203</b>
<b>About the authors</b> .....	<b>205</b>

# CUPRINS

---

<b>Introducere</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Noțiuni generale</b> .....	<b>13</b>
1.1. Mărimi fizice. Unități de măsură. Analiza dimensională .....	13
1.2. Informații necesare efectuării calculelor și construcțiilor diagramelor .....	20
1.3. Informații privind efectuarea măsurătorilor .....	21
1.4. Condiții de desfășurare a lucrărilor de laborator .....	25
1.5. Informații privind redactarea <i>Raportului de activitate</i> .....	27
<b>2. Lucrări de laborator în domeniul fenomenelor de transfer</b> .....	<b>29</b>
<b>Măsurători hidrodinamice</b> .....	<b>29</b>
2.1. Determinarea experimentală a regimului curgerii. Determinarea criteriului Reynolds și a valorii Reynolds critice .....	29
2.2. Determinarea experimentală a coeficientului de frecare în țevi ...	32
2.3. Etalonarea diafragmei .....	36
2.4. Determinarea experimentală a rezistențelor locale ale unui traseu ...	41
2.5. Determinarea experimentală a căderii de presiune în strat fix și în strat fluidizat .....	44
2.5.1. Determinarea experimentală a căderii de presiune în coloana cu umplutură uscată și în coloana umedă .....	46
2.5.2. Determinarea experimentală a căderii de presiune a stratului fluidizat .....	50
2.6. Determinarea experimentală a vitezei de sedimentare .....	53
<b>Măsurători de transfer termic</b> .....	<b>61</b>
2.7. Modelarea hidrodinamică a transferului termic conductiv .....	61
2.8. Determinarea experimentală a coeficientului parțial de transport termic la condensare .....	65
<b>Măsurători de transfer de substanță</b> .....	<b>69</b>
2.9. Determinarea coeficientului de transfer de component prin tehnica discului rotativ .....	69
2.10. Determinarea coeficientului de transfer de component în coloană cu film descendent .....	74
2.11. Determinarea experimentală a coeficientului de difuzie efectivă ...	80
<b>3. Lucrări de laborator de operații unitare</b> .....	<b>85</b>
<b>Operații unitare hidrodinamice</b> .....	<b>85</b>
3.1. Determinarea experimentală a eficienței agitatoarelor mecanice ...	85
3.2. Determinarea experimentală a constantelor filtrării .....	89
3.2.1. Determinarea experimentală a constantelor filtrării în filtrarea la vid .....	91

3.2.2. Determinarea experimentală a constantelor filtrării în filtrul presă . . . . .	92
<b>Operații unitare termice . . . . .</b>	<b>97</b>
3.3. Studiul transferului termic în regim nestaționar . . . . .	97
3.4. Studiul transferului termic în regim staționar în schimbătorul țeavă în țevă . . . . .	105
3.5. Determinarea experimentală a coeficientului global de transfer termic în schimbătoare multitubulare . . . . .	112
3.6. Determinarea experimentală a coeficientului global de transfer termic într-un schimbător cu plăci . . . . .	115
<b>Operații unitare de transfer de masă . . . . .</b>	<b>121</b>
3.7. Studiul absorbției într-o coloană cu umplutură . . . . .	121
3.8. Studiul cineticii uscării . . . . .	128
3.8.1. Uscarea convectivă liberă . . . . .	130
3.8.2. Uscarea prin radiație . . . . .	132
3.9. Studiul experimental al separării componentelor prin distilare simplă discontinuă . . . . .	136
3.10. Studiul experimental al salefierii sulfatului de sodiu din soluție. . .	140
<b>Anexe . . . . .</b>	<b>147</b>
<b>Nomograme . . . . .</b>	<b>177</b>
<b>Cuprinsul anexelor și nomogramelor . . . . .</b>	<b>193</b>
<b>Notații . . . . .</b>	<b>195</b>
<b>Bibliografie . . . . .</b>	<b>199</b>
<b>Abstract . . . . .</b>	<b>201</b>
<b>Rezumat . . . . .</b>	<b>203</b>
<b>Despre autori . . . . .</b>	<b>205</b>

# BEVEZETÉS

---

A transzportfolyamatok és a művelettan tárgyak, amint az előadások is bizonyítják, a folyamatok leírására a fizikai törvények mellett mérési eredményeket és gyakorlati tapasztalatokat is hasznosítanak. Mivel a mérések módszertanának és az eredmények feldolgozásának nagy szerepe van a mérnöki munkában, az útmutató tartalmazza:

- a gyakorlatok megtervezéséhez és lebonyolításához szükséges elméleti ismereteket, valamint
- a mérési adatok feldolgozását elősegítő tanácsokat.

Minden gyakorlati útmutató tartalmaz egy rövid elméleti részt, a gyakorlat célját, a berendezés leírását, a mérési feladatot, a mért és számított értékek rendszerezési és az eredmények kiértékelési módját. Javasolt a mérésekre alapozott eredmények kiértékelésére grafikus ábrázolást alkalmazni, illetve a számítási és a mérési adatokat kritikusán összehasonlítani.

Szerkezetileg az útmutató három fejezetből és mellékletekből áll. Az *Általános tudnivalók* című első fejezet az alapvető fizikai mennyiségek felsorolását, dimenzióegyenleteit és nemzetközi mértékegységeit (SI) tartalmazza. Ugyanebben a fejezetben található a mérésekkel, ábrákkal, számításokkal kapcsolatos általános ismeretek, a jegyzőkönyv készítésével kapcsolatos tudnivalók, valamint a legfontosabb munkavédelmi tanácsok.

Ezt követően az útmutató a két tantárgy leírásához igazodik, figyelembe véve, hogy nem minden hallgató tanrendjében szerepel mindkét tárgy. Így a következő, második fejezet a *Transzportfolyamatok*, míg a harmadik fejezet az *Élelmiszer- és környezetipari művelettan* tárgykörébe illeszkedik.

A *Transzportfolyamatok* fejezet a három transzportálandó jelenséghez igazodik, és pedig az impulzus, a hő és komponenstranszport mérési gyakorlatokat foglalja magába, a következő csoportosítás szerint:

*Áramlási mérési gyakorlatok:*

- az áramlás jellegének gyakorlati vizsgálata, a Reynolds-szám és a kritikus Reynolds-szám meghatározása;
- a csőúrlódási tényező gyakorlati meghatározása;
- a mérőperem és a reométer jelleggörbéje;
- a csőhálózat áramlási ellenállásának gyakorlati meghatározása;
- a töltött és a fluidizációs ágy áramlási nyomásvesztésének gyakorlati vizsgálata;
- az ülepedési sebesség gyakorlati meghatározása.

*Hőtranszporttal kapcsolatos gyakorlatok:*

- a hővezetés hidrodinamikai modellezése;
- a kondenzációs hőátadási tényező gyakorlati meghatározása.

*Komponensátadási gyakorlatok:*

– az anyagátadási együtttható gyakorlati meghatározása forgó korong módszerrel;

– az abszorpció vizsgálata lecsurgó filmes kolonnában;

– az effektív diffúziós tényező meghatározása.

A harmadik fejezet a *Műveleti egységekben végbemenő folyamatokat* vizsgálja az alábbi csoportosítás szerint:

*Hidrodinamikai műveletek:*

– keverőelemek hatékonyságának gyakorlati meghatározása;

– a szűrés állandóinak meghatározása nuccs- és prészűrővel.

*Hőátadási műveletek:*

– az instacionárius állapotú hőátvitel vizsgálata;

– a stacionárius állapotú hőátvitel tanulmányozása cső a csőben típusú hőcserélőben;

– a csőköteges hőcserélő hőátbocsátási tényezőjének gyakorlati meghatározása;

– lemezes hőcserélő hőátbocsátási tényezőjének kísérleti meghatározása.

*Komponensátadási műveletek:*

– abszorpció vizsgálata töltött oszlopban;

– izoterm szárítás kinetikai vizsgálata termogravimetriás mérleggel;

– az anyagszétválasztás tanulmányozása egyszeri desztillációs berendezésben;

– a kisózás gyakorlati tanulmányozása.

Az útmutató *Mellékletek* (táblázatok és diagramok) című fejezete a számítások elvégzéséhez szükséges adatokat, az anyagtulajdonságokat leíró összefüggéseket, valamint diagramokat tartalmazza.

Ezen laboratóriumi útmutató a 2010-es kiadás átdolgozott változata, amely a Sapientia EMTE Csíkszeredai Karán tanuló mérnökhallgatók számára készült, elsősorban belső használatra. A gyakorlatok elvégzésének módozata az egyre gyarapodó műszaki felszereltség függvényében évről évre változhat és bővílhet, a tartalmi és módszertani elvárások azonban megmaradnak, állandóan követve a megfogalmazott kompetenciák elsajátítását.

## ÁLTALÁNOS TUDNIVALÓK

### 1.1. Fizikai mennyiségek. Mértékegységek. Dimenzióanalízis

A laboratóriumi gyakorlatok alkalmával, a mérésekkor és a mérési adatok alapján elvégzett számítások során különböző fizikai mennyiségekkel dolgozunk. *A fizikai mennyiség valamely fizikai tulajdonság mérhető jellemzője.* Méréskor a mérendő mennyiséget ugyanannak a mennyiségnek a konvencionális egységnyi értékével hasonlítjuk össze. Az összehasonlítás eredménye egy szám, amely megmutatja, hogy a konvencionális mértékegység hányszor van meg a szóban forgó mennyiségben, vagyis a **fizikai mennyiség nem más, mint a mérőszám és a mértékegység szorzata** (Domonkos 2000).

Általában véve egy bizonyos tudományterületen  $d$  definiáló egyenletet használunk, melyben  $n$  darab ( $n > d$ ) fizikai mennyiség szerepel. Tehát  $(n-d)$  fizikai mennyiség meghatározatlan, mert nincs hozzárendelve definiáló egyenlet. Mivel ez az  $(n-d)$  fizikai mennyiség nem vezethető vissza más fizikai mennyiségre, ezért *alapmennyiségnek* nevezzük, míg a többi *származtatott mennyiségnek*. A mennyiségmeghatározásban szükségünk van a mérési módszerre és a mértékegységre egyaránt.

A műszaki tudományos szférában 1960-tól érvényben van a genfi Nemzetközi Mértékegységrendszer, az SI, amelyet 1963-tól hazánkban is elfogadtak. Az SI szerint az alapmennyiségek a hosszúság ( $L$ ), az idő ( $T$ ), a tömeg ( $M$ ), a hőmérséklet ( $\theta$ ), a komponensek anyagmennyisége ( $N$ ), az áram- ( $I$ ) és a fényerősség ( $I_v$ ). Az alapmennyiségek definícióját 2018-ban megváltoztatták fizikai (természeti) állandókra alapozva, értékük viszont változatlan maradt (<https://iupac.org/.....the-new-si/>. 28.02.2020).

Az SI alapmennyiségeinek a mértékegységét az 1.1.1. táblázat tartalmazza.

A nemzetközi mértékegységrendszerben 17 származtatott egységnek adtak külön nevet. A gyakrabban használtakat az 1.1.2. táblázat tartalmazza.

A mértékegység fogalmától függetlenül összefüggést lehet felállítani az alapmennyiségek és az azokból levezetett bármely mennyiség között. Ennek az összefüggésnek a kifejezője a **dimenzió**. A dimenzió jelölésére nyomtatott betűt használunk, és azokat szögletes zárójelbe tesszük.

**1.1.1. táblázat.** A nemzetközi mértékegységrendszer alap- és kiegészítő egységei

Alapegység		Törvényes mértékegysége	
Neve	Jelölése	Neve	Jelölése
Hosszúság	$L$	méter	m
Tömeg	$M$	kilogramm	kg
Idő	$T$	másodperc	s
Elektromos áramerősség	$I$	amper	A
Termodinamikai hőmérséklet	$\theta$	kelvin	K
Anyagmennyiség	$N$	mól	mol
Fényerősség	$I_v$	kandela	cd
<b>Kiegészítő egységek</b>			
Síkszög		radián	rad
Térszög		szteradián	sr

Forrás: *Sistemul internațional de unități*, 1982.

**1.1.2. táblázat.** A fontosabb, nevet viselő származtatott egységek

Mértékegység		Fizikai mennyiség			
Neve	Jele	Neve	Jele	Dimenzió-egyenlete	Mértékegysége alapegységben
Newton	N	erő	$F$	$[F] = [MLT^{-2}]$	1 N = kg·m·s <sup>-2</sup>
Pascal	Pa	nyomás	$P$	$[P] = [MT^{-2}L^{-1}]$	1 Pa = kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-2</sup>
Joule	J	munka, energia, hőmennyiség	$E$	$[E] = [ML^2T^{-2}]$	1 J = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup>
Watt	W	teljesítmény	$W$	$[W] = [ML^2T^{-3}]$	1 W = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup>
Volt	V	elektromos feszültség	$U$	$[U] = [ML^2T^{-3}I^{-1}]$	1 V = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup> ·A <sup>-1</sup>
Ohm	$\Omega$	elektromos ellenállás	$R$	$[R] = [ML^2T^{-3}I^{-2}]$	1 $\Omega$ = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup> ·A <sup>-2</sup>
Siemens	S	elektromos vezető-képesség	$1/R$	$[1/R] = [M^{-1}L^{-2}T^3I^2]$	1 S = kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>3</sup> ·A <sup>2</sup>

Forrás: *Sistemul internațional de unități*, 1982.

Például az erő dimenzióegyenlete a következőképpen írható fel:

– az  $F = m \cdot a$  egyenletből kiindulva felírható az  $[F] = [MLT^{-2}]$  dimenzióegyenlet;

- a fajhő esetében pedig a  $c_p = \left(\frac{dH}{dT}\right)_p$  egyenlet alapján felírható a

$[c_p] = [\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}] = [ML^2T^{-2}N^{-1}\theta^{-1}]$  dimenzióegyenlet.

Tehát valamely mennyiség dimenzióján az alpmennyiségek olyan hatvány-szorzatát értjük, ahol a kitevők pozitív vagy negatív egész számok vagy zéró. A dimenzió csak a kiválasztott alpmennyiségektől függ, és semmit sem mond a mértékegységekről. A *dimenzióvizsgálat*, vagy más néven a *dimenzióanalízis*, a számítás ellenőrzésére vagy ismeretlen összefüggések felismerésére szolgálhat.

A mértékegység törvényes többszörösét, illetve törtrészeit az egység neve elé illesztett, az 1.1.3. táblázatban feltüntetett **prefixumok** egyikével kell kifejezni. A  $10^6$ -nál nagyobb prefixumokat nagy-, míg az annál kisebbeket kisbetűvel írjuk. **Összetett prefixumot nem használunk!**

### 1.1.3. táblázat. Törvényes többszörös és törtrész prefixumok

Neve	Jele	Szorzó	Neve	Jele	Szorzó
Exa	E	$10^{18}$	deci	d	$10^{-1}$
Peta	P	$10^{15}$	centi	c	$10^{-2}$
Tera	T	$10^{12}$	milli	m	$10^{-3}$
Giga	G	$10^9$	mikro	$\mu$	$10^{-6}$
Mega	M	$10^6$	nano	n	$10^{-9}$
kilo	k	$10^3$	piko	p	$10^{-12}$
hekto	h	$10^2$	femto	f	$10^{-15}$
deka	da	$10^1$	atto	a	$10^{-18}$

Forrás: *Sistemul internațional de unități*, 1982.

Az említett mértékegységeken kívül az SI előírások szerint korlátlanul használhatók az 1.1.4.a. táblázat egységei, és korlátozottan az 1.1.4.b. táblázat egységei.

Az 1.1.5. táblázatban a transzportfolyamatok és művelettanban leggyakrabban előforduló fizikai mennyiségek jelölését, dimenzióját és SI mértékegységét tüntettük fel.

### 1.1.4.a. táblázat. Korlátlanul használható SI mértékegységek

Mértékegység		A megfelelő fizikai mennyiség	Megjegyzés
Neve	Jele		
liter	l (újabban L)	térfogat	Használható prefixummal
tonna	t	tömeg	
kilométer per óra	km/h	sebesség	
wattóra	Wh	munka, energia	



Mértékegység		A megfelelő fizikai mennyiség	Megjegyzés
Neve	Jele		
fok, perc, másodperc	°, ', ''	síkszög	Nem használható prefixummal
óra, perc	h, min	idő	
Celsius-fok	°C	hőmérséklet	

Forrás: *Sistemul internațional de unități*, 1982.

**1.1.4.b. táblázat.** *Kizárólag meghatározott területen használható mértékegységek*

Mértékegység		Megjegyzés
Neve	Jele	
Hektár	ha	Csak földterület meghatározására, de prefixum nélkül használható
Bar	bar	Csak folyadékok és gázok nyomásának meghatározására használható (1 bar = 10 <sup>5</sup> Pa)
Elektronvolt	eV	Csak az atomfizikában és a magfizikában használható (1 eV = 1,60219·10 <sup>-18</sup> J)
Karát	k	Drágakövek tömegegysége (1 k = 2·10 <sup>-4</sup> kg)
Voltamper	VAr	Az elektromos látszólagos (meddő) reaktív teljesítmény mértékegysége, váltóáram esetén

Forrás: *Sistemul internațional de unități*, 1982.

**1.1.5. táblázat.** *Fontosabb műveletti fizikai mennyiségek SI mértékegysége*

Fizikai mennyiség			
Neve	Jele	Dimenzióegyenlete	SI mértékegysége
Felület területe	$A, S$	$[A] = [L^2]$	m <sup>2</sup>
Sűrűség	$\rho$	$[\rho] = [ML^{-3}]$	kg/m <sup>3</sup>
Egységnyi térfogat	$\bar{a}$	$[\bar{a}] = [M^{-1}L^3]$	m <sup>3</sup> /kg
Fordulat	$n$	$[n] = [T^{-1}]$	s <sup>-1</sup>
Sebesség	$w$	$[w] = [L \cdot T^{-1}]$	m/s
Gyorsulás	$a, g$	$[a] = [L \cdot T^{-2}]$	m/s <sup>2</sup>
Dinamikus viszkozitás	$\eta$	$[\eta] = [ML^{-1}T^{-1}]$	Pa·s
Kinematikus viszkozitás	$\nu$	$[\nu] = [L^2T^{-1}]$	m <sup>2</sup> /s
Diffúziós állandó	$D$	$[D] = [L^2T^{-1}]$	m <sup>2</sup> /s
Hődiffúziós állandó	$\alpha$	$[\alpha] = [L^2T^{-1}]$	m <sup>2</sup> /s
Belső energia	$U$	$[U] = [ML^2T^{-2}]$	J
Entalpia	$H$	$[H] = [ML^2T^{-2}]$	J

Fizikai mennyiség			
Neve	Jele	Dimenzióegyenlete	SI mértékegysége
Térfogatáram	$V_\tau, \dot{V}$	$[V_\tau] = [L^3 \cdot T^{-1}]$	m <sup>3</sup> /s
Tömegáram	$m_\tau, \dot{m}$	$[m_\tau] = [MT^{-1}]$	kg/s
Felületi feszültség	$\sigma$	$[\sigma] = [MT^{-2}]$	kg/s <sup>2</sup>
Teljesítmény	$N, P$	$[P] = [ML^2 \cdot T^{-3}]$	W
Hővezetési együttható	$\lambda_\tau$	$[\lambda_\tau] = [ML \cdot T^{-3} \cdot \theta^{-1}]$	W/(m·K)
Hőátadási együttható	$\alpha, K$	$[\alpha] = [K] = [MT^{-3} \cdot \theta^{-1}]$	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Entrópia	$S$	$[S] = [ML^2 \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1}]$	J/K

Forrás: Szép–Gavrilá–András 2012, 11.

Például ha a sűrűség g/cm<sup>3</sup>-ben van kifejezve, akkor SI rendszerbe való átszámításakor a következő általánosan érvényes módszert használjuk:

Legyen egy fizikai mennyiség, melyet egy bizonyos mértékegységi rendszerben az alábbi kifejezés ír le:

$$m = E_1 \cdot b_1 \cdot c_1 \cdot d_1 \quad (1.1.1)$$

Ugyanazt a mennyiséget más mértékegységi rendszerben az (1.1.2) kifejezés írja le:

$$m = E_2 \cdot b_2 \cdot c_2 \cdot d_2 \quad (1.1.2)$$

Elosztva a két kifejezést, az (1.1.3) összefüggést kapjuk:

$$\frac{m}{m} = \frac{E_1 \cdot b_1 \cdot c_1 \cdot d_1}{E_2 \cdot b_2 \cdot c_2 \cdot d_2} = \frac{E_1}{E_2} \cdot m_b \cdot m_c \cdot m_d \quad (1.1.3)$$

Innen:

$$E_2 = E_1 \cdot m_b \cdot m_c \cdot m_d \quad (1.1.4)$$

Tehát a mért mennyiség egyenlő:

$$m = E_1 \cdot (m_b \cdot b_2) \cdot (m_c \cdot c_2) \cdot (m_d \cdot d_2) \quad (1.1.5)$$

**Feladat:** Alkalmazzuk a módszert az 1,23 g/cm<sup>3</sup> folyadék sűrűségének kifejezésére SI rendszerben (kg/m<sup>3</sup>)!

Figyelembe véve a mértékegységeket a következő összefüggéseket kapjuk:

$$m_b = \frac{\text{g}}{\text{kg}} = 10^{-3}; \quad m_c = \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^3} = (10^{-2})^3 = 10^{-6}$$

Behelyettesítve az (1.5) összefüggésnek megfelelő egyenletbe, felírható:

$$\begin{aligned} \rho &= 1,23 \text{ g/cm}^3 = 1,23 \cdot (10^{-3} \text{ kg}) \cdot (10^{-2} \text{ m})^{-3} = \\ &= 1,23 \cdot (10^{-3+6}) \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) = 1230 \text{ kg/m}^3. \end{aligned}$$

Az 1.1.6. táblázatban feltüntettük az angolszász mérnöki gyakorlatban előforduló fizikai mennyiségek mértékegységét és azok SI-ben megadott megfelelőjét.

**1.1.6. táblázat.** Az SI és az angolszász irodalomban gyakrabban használt mértékegységek közötti összefüggések

Fizikai mennyiség		A gyakran használt mértékegység és az SI mértékegység közötti összefüggés
Megnevezése	SI mértékegysége	
Hosszúság	m	1 feet (láb) = 1 ft = 0,3048 m 1 yard = 0,9144 m 1 inch (hüvelyk, coll) = 1 in = 0,0254 m
Tömeg	kg	1 lb (font) = 0,454 kg
Hőmérséklet	K	$T$ (K) = $t$ (°C) + 273,15 $\theta$ (°F) = $1,8 \cdot t$ (°C) + 32
Terület	m <sup>2</sup>	1 ft <sup>2</sup> = 0,0929 m <sup>2</sup> 1 in <sup>2</sup> = 6,4516·10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> 1 ha = 100 ár = 10000 m <sup>2</sup> 1 Hold = 1 acre = 4046,86 m <sup>2</sup>
Térfogat	m <sup>3</sup>	1 ft <sup>3</sup> = 28,3 L = 2,83·10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> 1 in <sup>3</sup> = 16,387 cm <sup>3</sup> = 16,387·10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> 1 angol hordó = 1 UK barrel = 0,1637 m <sup>3</sup> 1 USA hordó = 1 US barrel = 159·10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> 1 bushel = 35,24·10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> 1 USA gallon = 1 US gal = 3,785·10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> 1 angol gallon = 1 UK gal = 4,546·10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
Erő	N	1 kgf = 9,81 N 1 dyn = 10 <sup>-5</sup> N 1 lbf = 4,45 N
Nyomás	Pa	1 lbf/in <sup>2</sup> = 6894,76 Pa 1 lbf/ft <sup>2</sup> = 47,88 Pa 1 barye = 0,1 Pa 1 N/m <sup>2</sup> = 1 Pa = 1 kg·m/(s·m) <sup>2</sup> = 1 kg/(m·s <sup>2</sup> ) 1 torr = 1 Hgmm = 133,3 Pa 1 atm = 760 Hgmm = 101325 Pa = 1,013·10 <sup>5</sup> Pa 1 at = 1 kp/cm <sup>2</sup> = 1 kgf/cm <sup>2</sup> = 9,81·10 <sup>4</sup> N/m <sup>2</sup> = 9,81·10 <sup>4</sup> Pa = 10 <sup>4</sup> mmH <sub>2</sub> O (mm v.o.) 1 bar = 10 <sup>5</sup> Pa = 10 <sup>5</sup> N/m <sup>2</sup> = 10 N/cm <sup>2</sup> = 10/9,81 at = 1,0197 at 1 mmH <sub>2</sub> O = 10 <sup>-4</sup> kgf/cm <sup>2</sup> = 9,81 Pa 1 psi (poundforce/square inch) = 1 lbf/in <sup>2</sup> = 6897,757 Pa

Fizikai mennyiség		A gyakran használt mértékegység és az SI mértékegység közötti összefüggés
Megnevezése	SI mértékegysége	
Mechanikai munka	J	1 BTU = 1055,1 J 1 lbf·ft = 1,356 J 1 lbf·in = 0,113 J 1 cal = 4,184 J 1 Gcal = 4,184 GJ 1 kWh = 3,6·10 <sup>6</sup> J = 3,6 MJ 1 kgf·m = 9,81 J = 9,81 N·m = 9,81 kgm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Teljesítmény	W	1 LE (CP) = 736 W 1 HP = 746 W 1 erg/s = 10 <sup>-7</sup> W, 1 kcal/h = 1,163 W 1 kgf·m/s = 9,81 J/s = 9,81 W
Sűrűség	kg/m <sup>3</sup>	1 lb/ft <sup>3</sup> = 16,02 kg/m <sup>3</sup> 1 lb/in <sup>2</sup> = 27,68·103 kg/m <sup>3</sup>
Fajhő	J/(kg·K)	1 BTU/(lb·°F) = 4186,8 J/(kg·K) 1 erg/(kg·K) = 10 <sup>-7</sup> J/(kg·K) 1 kcal/(kg·K) = 4186,8 J/(kg·K)
Hővezetési tényező	W/(m·K)	1 BTU/(ft·h·°F) = 1,73 W/(m·K) 1 kcal/(m·h·°C) = 1,163 W/(m·K)
Hőátadási/átviteli tényező	W/(m <sup>2</sup> ·K)	1 BTU/(ft <sup>2</sup> ·h·°F) = 5,6 W/(m <sup>2</sup> ·K) 1 kcal/(m <sup>2</sup> ·h·°C) = 1,163 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Entalpia, latens hő	J/kg	1 BTU /lb = 2326 J/kg 1 kcal/kg = 4186,8 J/kg
Dinamikai viszkozitás	Pa·s	1 lbf·s/ft <sup>2</sup> = 47,88 Pa·s 1 cP = 10 <sup>-3</sup> Pa·s 1 P (1 Poise) = 1 g/(cm·s) = 10 <sup>-1</sup> Pa·s
Kinematikai viszkozitás	m <sup>2</sup> /s	1 ft <sup>2</sup> /s = 0,0929 m <sup>2</sup> /s 1 ft <sup>2</sup> /h = 25,81·10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s 1 St (1 Stokes) = 1 cm <sup>2</sup> /s = 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
Diffúziós tényező	m <sup>2</sup> /s	1 ft <sup>2</sup> /s = 0,0929 m <sup>2</sup> /s
Felületi feszültség	N/m	1 kgf/m = 9,81 N/m
Frekvencia	Hz	1 s <sup>-1</sup> = 1 Hz 1 ford/s = 1 Hz

Forrás: Singh–Heldman 2009.

## 1.2. Számításokkal és ábrákkal kapcsolatos tudnivalók

A műszaki számítások annyiban különböznek a matematikai számításoktól, hogy az egyszerűsítés következtében nincs értelme a megengedett hibahatáron túli pontosság túlszárnyalásának. A mérnöki feladatok általában nagyon sok változóval dolgoznak, és egyszerűsítések nélkül a problémák sokszor meg sem oldhatók. Bármely egyszerűsítés előfeltétele, hogy ne változtassa meg a jelenség lényegét. Sok mérnöki számítást nagyon rövid idő alatt kell elvégezni, hisz a döntéshozatal ezt megköveteli. Ilyenkor, akár a pontosság kárára is, de gyors eredményt várunk. Minden mérnöki feladat megoldása megkövetel egy hasznos pontosságot. Mivel a számítás mért adatokkal dolgozik, és az eredményt is méréssel bizonyítjuk, nincs értelme, hogy a számítás pontossága túlszárnyalja a mérési precizitást. Ez nem jelenti azt, hogy a számítást pontatlan és hanyag módon végezzük el. Általában a mérnöki számításokban 1% eltérést elfogadhatónak tekintünk (Domonkos 2000).

A számítások elvégzésekor mindig nevezünk meg a számítandó mennyiséget, adjuk meg a leíró összefüggést, szükség esetén nevezünk meg a benne szereplő mennyiségeket a mértékegységükkel együtt, majd helyettesítünk be és írjuk ki a számított eredményt, feltüntetve a mértékegységet is. Ami a mértékegységet illeti, műszaki számításokban törvényileg kötelezve vagyunk az SI rendszer használatára.

**Feladat:** Számítsuk ki a  $h = 0,76$  m magasságú higanyoszlopnak megfelelő nyomást!

A nyomás és a szintkülönbség közötti összefüggést a következőképpen írjuk le:

$$p = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (1.2.1)$$

ahol:  $p$  – a nyomás, Pa;  $\rho$  – a folyadék sűrűsége (higany esetében  $13600 \text{ kg/m}^3$ );  $g$  – a földi gravitációs gyorsulás, ( $9,81 \text{ m/s}^2$ );  $\Delta h$  – szintkülönbség, m.

Behelyettesítve következik, hogy a számítandó nyomás:

$$p = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,76 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

A számításokhoz nagyon sok esetben nem csak az általunk mért adatokra van szükség, hanem a kézikönyvek táblázataiban, diagramjaiban feltüntetett mennyiségekre is. Ezek általában a tiszta anyagok vagy egyszerűbb oldatok tulajdonságait fejezik ki. Az összetettebb keverékek tulajdonságait megfelelő összefüggésekkel becsüljük meg.

A mért vagy számított eredményeket táblázatokban adjuk meg, majd ezek alapján rajzoljuk meg a különböző típusú diagramokat. A diagram lehet sík- vagy térbeli ábrázolás. Ha a diagramot számítás céljából rajzoljuk, akkor legtöbbször a koordináta-rendszert úgy választjuk, hogy egy egyenest eredményezzen. Ennek meredekségéből és tengelymetszetéből meghatározzuk a kívánt ismeretlenek (állandó, tényező stb.) értékét. A diagramszerkesztésnél használhatunk logaritmuskálát is.

A jól szerkesztett diagram megköveteli (Domonkos 2000; *Vegyipari műveleti laboratóriumi gyakorlatok*, Veszprém, 2000) a következőket:

– Az abszcisszán (vízszintes tengelyen) a független, az ordinátán (a függőleges tengelyen) a függő változót ábrázoljuk.

– A tengely alá, illetve bal felére felírjuk a változó nevét, jelét és mértékegységét.

– A léptéket úgy választjuk, hogy az könnyen átszámítható legyen (például jobb, ha 10 K-nek 1 mm felel meg, és nem a 9,33 K-nek felel meg az 1 mm).

– A vízszintes és a függőleges tengely léptékét úgy választjuk, hogy az ábrázolt görbe (görbék) egy tengelyhez se közeledjen(ek). A 45°-os dőlésszög a legmegfelelőbb.

– Sok esetben a koordináták léptékét úgy választjuk, hogy csak az érdekelt mezőben ábrázolunk. Tehát nincs szükség arra, hogy origóból induljunk. Épp ezért ajánlott, hogy az ábrázolás megkezdése előtt keressük meg mind az ordinátára, mind az abszcisszára felveendő adatok maximális és minimális értékeit, és ennek figyelembevételével készítsük el a tengely beosztását.

– Minden mért/számított pontot feltüntetünk a diagramban.

– Ha a koordináta-rendszer nem követeli meg (itt a speciális egyeneseknek megfelelő ábrázolásra gondolunk), ne kössük össze az egyes mérési pontokat egyenes vonallal. Mindig a legjobban illeszkedő görbét rajzoljuk be.

– Ha több görbét veszünk fel egy ábrára, a pontokat és a görbéket jól láthatóan különböztessük meg.

– Az illeszkedés jósága a korrelációs koefficiens négyzetének értékéből ( $R^2$ ) állapítható meg. Amennyiben ez 1-hez közeli érték, az illeszkedés megfelelő. Ellenkező esetben más függvénnyel kell próbálkozni.

– Az exponenciális függvények esetén ( $y = a \cdot x^n$ ;  $y = a \cdot b^x$ ) logaritmikus koordináta-rendszerben dolgozunk. Bonyolultabb függvények esetén használható a többszörös logaritmus.

– A szövegbe illesztett ábráknak sorszámuk és nevük van. Sokszor a név alá vagy a be nem rajzolt mezőbe magyarázatot is írunk, ezzel hasznossá téve az ábrázolást egy későbbi időpontra is. Ne írjuk tele a mezőt megjegyzésekkel, hisz csak rontjuk az ábra értelmezési lehetőségét.

Ha az adatokat táblázatban összegezzük, akkor annak tartalmaznia kell a táblázat számát és megnevezését, a belefoglalt mennyiségek nevét, jelölését és mértékegységét, és minden olyan adatot, amely a felhasználásra jellemző.

### 1.3. A mérési feladatokkal kapcsolatos tudnivalók

A fizikai mennyiségek meghatározására méréseket végzünk. Méréskor összehasonlítjuk a mérendő mennyiséget ugyanannak a mennyiségnek a konvencionális egységnyi értékével. Az így kapott szám kifejezi, hogy a konvencionális

mennyiség hányszor van meg a mérendő mennyiségben. Mint ismeretes, egy mennyiség pontos értékét szinte lehetetlen meghatározni. Éppen ezért a mérés pontosságát (precizitását) úgy választjuk, hogy megfeleljen a célnak. Ha a precizitás növelésére törekszünk, számolni kell nemcsak a költségek növekedésével, hanem a mérési idő növekedésével is. Például egy hosszúság háromtizedes pontosságú méréséhez tízszer annyi anyagi és időbeli befektetés szükséges, mint ha ugyanazt a mennyiséget kéttizedes pontossággal mérnénk (Domonkos 2000).

A mérésprecizitásnak a megválasztása attól is függ, hogy mire is használjuk a mérés eredményét. Más a precizitás egy csőhálózat hosszának meghatározásakor, mint egy belső égésű motor dugattyúátmérőjének mérésekor. Míg az első esetben néhány milliméter eltérés is megengedett, a második esetben mikrométer pontosság szükséges. A túlzott pontosság késlelteti az eredmény elérését, míg a túl alacsony pontosság torzítja az eredményt. Tudni kell azt is, hogy egy bizonyos feladat megoldásakor a mérési pontosság a mérvadó a számított mennyiségek pontosságának megadásában. A mérnöki számításokban, ahol az eredményt általában normál alakban írjuk fel (példa:  $2,357 \cdot 10^{-5}$  m/s), a tizedesvessző utáni 2-3 értékes szám legtöbbször elég pontosságot jelent (Domonkos 2000).

Ahhoz, hogy egy mennyiséget meg tudjunk határozni, szükségünk van egy műszerre/mérőberendezésre és egy olyan mérési módszerre, amely reprodukálhatóvá teszi a mérést. A mérőberendezés/műszer szolgáltatja azt a kimenőjelet ( $y_k$ ), amely valamilyen függvénykapcsolatban áll a mérendő mennyiséggel ( $x_b$ ):

$$y_k = f(x_b) \quad (1.3.1)$$

**Érzékenységek** nevezzük a bemenőjel egységnyi változására bekövetkező kimenőjel változását:

$$S = \frac{\Delta y_k}{\Delta x_b} \quad (1.3.2)$$

Ha a mérendő mennyiség és a kimenőjel egyenes arányban van, akkor az érzékenységet az alábbi összefüggés írja le:

$$S = \frac{y_k}{x_b} \quad (1.3.3)$$

Általában az  $y_k$  kimenőjel valamiben különbözik az  $x_b$  mérendő jeltől, így a mért  $x_m$  érték is különbözik a valódi értéktől. Ezt a különbséget a *mérés hibájának* nevezzük:

$$\delta x = x_m - x_b \quad (1.3.4)$$

A mérési hiba, mint ahogy *Liszi J.* fogalmaz (Domonkos 2000), a következő okokra vezethető vissza:

- a mérés, amely beavatkozást jelent a rendszerbe, akarva-akaratlanul megváltoztatja a rendszert;
- nem ismeretes elég pontossággal az  $f$  függvény, és így a mérés eleve hibás;
- definíciós problémák is előállhatnak, amelyeket nem lehet kiküszöbölni (például az abszolút hőmérsékleti skála nullapontja is csak 4 tizedes pontosságig definiálható).

A mérési hibák lehetnek rendszeres, azaz szisztematikus hibák, vagy véletlen hibák. A hibák gyakori okai a mérőberendezésekben, a mérőt végzőben és a kísérleti körülményekben keresendők.

A mérőberendezések okozta hibák:

- leolvasási hiba;
- irányváltoztatási hiba, vagyis a mérendő értéket különböző irányból való megközelítés esetén különböző értéket kaphatunk;
- nullpontvándorlás;
- válaszidő, tehát meg kell várni az egyensúly beállítását.

A kísérleti körülmények változása hibát okozhat mind a mérések alkalmával, mind a mérések megismétlésekor. Például a levegő hőmérséklet-ingadozása, a légköri nyomás, a levegő nedvességtartalma, mozgás, elektromos vagy mágnesestér-változás stb. mind befolyásolhatja a mérés pontosságát.

Ugyanazt a mennyiséget többször megmérve a fellépő hibák miatt eltérő, szóródó  $x_i$  adatokhoz jutunk. A mért adatok átlagértékét a következő összefüggéssel becsüljük meg:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3.5)$$

A mérési adatnak az átlagértéktől való eltérését *deviációnak* nevezzük, és az (1.3.6) összefüggéssel számítjuk ki:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (1.3.6)$$

Ha nincs módszeres hiba, akkor a mennyiség valódi értékét végtelen sok mérés átlagából számítjuk ki:

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3.7)$$

Ha az  $n$  nem túl nagy (kisebb mint 30), akkor a szórást az (1.3.8) összefüggés, míg nagy  $n$  számok esetén a standard deviációt az (1.3.9) összefüggés adja meg:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.3.8) \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (1.3.9)$$

Ha az  $n$  tart a végtelenhez, akkor az  $s \rightarrow \sigma$  és az  $\bar{x} \rightarrow \mu$ . Mivel az  $\bar{x}$  értékét  $n$  mérés segítségével határoztuk meg, a szabadsági fokot úgy kapjuk meg, ha az  $n$ -ből kivonunk 1-et.

Bár a pontos érték szinte meghatározhatatlan, azt, hogy milyen határok között van, mégis meg tudjuk mondani. Erre a *konfidenciaintervallum* szükséges, mely számos mérést feltételez. Gosset 1908-ban bevezette a  $t$  statisztikai paramétert (1.3.10), amelyet az irodalom **Student-próbaként** ismer, és megfogalmazta, hogy miként lehet a konfidenciaintervallumot a kevés mérés segítségével kijelölni.

$$t = \frac{x - \mu}{s} \quad (1.3.10)$$



A valószínűségi szintek és a szabadsági fokok függvényében ki lehet számítani a  $t$  értékeit (lásd az 1.3.1. táblázatot), amelyek segítségével megadható a mérési eredmény:

$$\mu = \bar{x} \pm \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (1.3.11)$$

Nézzük meg, hogyan is adható meg a Student-próba figyelembevételével a mérési eredmény!

**Feladat:** Legyen egy egyszerű nyomásesés-mérés U-csöves manométerrel. Az ugyanolyan körülmények között végzett 4 mérés eredménye a következő: 13,2; 13,4; 13,30 és 13,40 cm v.o. (vízoszlop).

Először számítsuk ki a mérések átlagértékét:

$$h = \frac{1}{4} \sum_1^4 h_i = \frac{13,2 + 13,4 + 13,3 + 13,4}{4} = 13,325 \text{ cm}$$

**1.3.1. táblázat.** A Student-próba értékei a szabadsági fok ( $n-1$ ) és a valószínűségi szint függvényében

$n-1$	Valószínűségi szint		
	90%	95%	100%
3	2,35	3,18	5,84
4	2,13	2,78	4,60
5	2,02	2,57	4,03
6	1,94	2,45	3,71
7	1,90	2,36	3,50
8	1,86	2,31	3,36
9	1,83	2,26	3,25
10	1,81	2,23	3,17
11	1,80	2,20	3,11
12	1,78	2,18	3,06
$\infty$	1,64	1,96	2,58

Forrás: Domonkos 2000.

Számítsuk ki most a szórás értékét:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^4 (h_i - \bar{h})^2}{4-1}} = \sqrt{\frac{(13,2 - 13,325)^2 + 2 \cdot (13,4 - 13,325)^2 + (13,3 - 13,325)^2}{4-1}} = 0,0957$$

Az 1.3.1. táblázatból a 95%-os valószínűségi szintnek megfelelő  $t$  érték 3,18. Tehát az eredmény:

$$\mu = \bar{x} \pm \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}} = 13,325 \pm \frac{3,18 \cdot 0,0957}{\sqrt{4}} = 13,325 \pm 0,152 \text{ cm}$$

## 1.4. A laboratóriumi gyakorlatok elvégzésének alapfeltételei

A mérési feladat elvégzése feltételezi, hogy a hallgató ismerje a kitűzött célt, a berendezés szerkezetét és működését, a mérési eredmények feldolgozásának módját, valamint a gyakorlattal kapcsolatos munkavédelmi előírásokat. Ezen ismeretek elsajátítására szolgál ez az útmutató is. Épp ezért a hallgató a kitűzött mérési feladathoz kapcsolódó ismereteket az útmutatóból elolvassa, kijegyzeteli a laborfüzetébe úgy, hogy az minden mérés esetében tartalmazza a gyakorlat címét, célját, a gyakorlati készülék vázlatát, leírását, működését, a gyűjtendő adatok táblázatát, az adatfeldolgozási módszert. Ismereteiről a laborgyakorlat megkezdése előtt írásban vagy szóban számot kell adnia a gyakorlatvezetőnek! **Csak az végezheti el a gyakorlatot, akinek kellő felkészültsége van!** A sikeres laborgyakorlat előfeltétele az alapos felkészülés! **Hiányzás vagy elutasítás esetében a gyakorlatot a megszabott időig be kell pótolni!** Ugyancsak ismétlésre szorul az a laborgyakorlat is, melynek jegyzőkönyve nem elfogadható!

A laborgyakorlatokat úgy terveztük, hogy minél kevesebb baleseti lehetőség legyen. Ez nem azt jelenti, hogy a mérések nem járnak balesetveszéllyel, hisz a nyomás alatti gáz és víz, az elektromos áram, a működő gépek és műszerek, az üvegeszközök és üvegekészülékek mind veszélyforrások lehetnek. Épp ezért fontos megjegyezni a következőket:

- A laboratóriumban fegyelmezett és figyelmes magatartást kell tanúsítani, mind magunk, mind társaink érdekében.
- A laboratóriumba csak a szükséges személyi tárgyak vihetők be, a ruhákat, táskákat, uzsonnát stb. a ruhatárban hagyjuk.
- A laboratóriumban a laborköpeny viselése kötelező.
- A laboratórium területén tilos étkezni.
- A laboratórium területén tilos dohányozni, az csak az épületen kívül az erre a célra kijelölt helyen megengedett.
- Minden vegyszert automatikusan mérégnek tekintünk, épp ezért semmilyen laboratóriumi eszközt nem használunk ivásra, étkezésre.
- A működő berendezéseket nem szabad felügyelet nélkül hagyni.
- Amikor mérünk, akkor nem végzünk más tennivalót, például adatkeresést, számítást stb.
- Az elektromos berendezésekhez csak a szükséges mértékben nyúlunk hozzá, és akkor is száraz kézzel. A csatlakozóba mindig a megfelelő dugaszt használjuk.

- Tilos a nem megfelelő állapotú elektromos vezetékek használata.
- Nem támaszkodunk működő villanymotorra, sőt a motorfelület érintését is kerüljük.
  - Keverőcserét csak leállt villanymotoron végzünk, sőt tanácsos a csatlakozóból is kihúzni a dugaszt.
  - A csapok, szelepek nyitását lassan végezzük, figyelve a mérőműszerek jelzését. Ne „nézzünk szembe” a nyíló csappal és szeleppel!
  - Az üvegkészülékek nyomásvédelme céljából tanácsos, hogy az üvegberendezéseket ne közvetlenül, hanem egy hármass csatlakozó alkalmazásával csatlakoztassuk a nyomás alatt lévő tartályhoz, a fojtószelepet a szabad végre szereljük.
  - Tanácsos a mérés alatt nem csak a műszerek kijelzőire összpontosítani, hanem a berendezés működését is figyelni.
  - Ha a méréseket befejeztük, először összefoglaljuk a munkát, majd rendet teszünk a munkaasztalon.
  - A laboratórium területét véglegesen csak a mérésvezető személy engedélyével hagyhatjuk el.
  - Bármilyen, a gyakorlat alkalmával történt károsodásról azonnal jelentést kell tenni a gyakorlat vezetőjének. A saját hibából származó töréskárt kötelesek vagyunk megtéríteni.
  - A munka során véletlenül a bőrünkre került vegyszert (kivétel a tömény kénsavat, melyet előtte száraz ruhával letörölünk) bő vízzel azonnal le kell mosni. Ha szájba kerül a vegyszer (pipettázás közben), vízzel alaposan öblítsük ki. Ha szemünkbe került a vegyszer, azonnal tiszta edényből desztillált vízzel egy negyed órát öblöggessük.
  - Bázikus közeggel való érintkezés esetén 1%-os bórsavoldatot, savas közeg esetén 1%-os nátrium-tetraborát (borax) oldatot használunk.
  - Szemsérülés esetén kötelező orvoshoz menni!
  - Gázpalack használata esetén a szelepet csak kézzel nyissuk ki. Tilos bármilyen kulcs használata!
  - Veszélyes gázokkal való gyakorlatok esetén a munkahelyen kötelező a megfelelő gázmaszk jelenléte és szükség esetén annak használata. Gázömlés esetén, ha elzárásra nincs lehetőségünk, akkor minél hamarabb hagyjuk el a laboratóriumot.
  - Tűz esetén kerüljük a pánikot. Kisebb tüzet törölőkendővel, nagyobbat a laboratóriumban lévő tűzoltópalack vagy a folyóson lévő homok használatával oltunk el.
  - Ha egy laborszerszám sérülést okoz, a laborvezetőt azonnal értesíteni kell, aki elsősegélyben fogja részesíteni a sérültet, súlyosabb esetben riasztja a mentőszolgálatot.
  - Különleges veszélyt hordozó gyakorlatokon a laboratóriumvezető utasításai szerint kell cselekedni.
  - Földrengés esetén, ha földszinti laborban vagyunk, minél hamarabb hagyjuk el az épületet, és álljunk meg a parkolóban a zöldterületen, minél távolabb

az épülettől. Ha emeleti laborban ér a földrengés, keressük a legszilárdabb helyet (ajtók, gerendák, fémasztal stb.), és álljunk/üljünk alája. Kerüljük az ablakközeleli, illetve az üvegajtó melletti helyeket és a lépcsőket.

– A kilengés elmúltával óvatosan hagyjuk el az épületet, követve a folyosón megjelölt útirányt.

## 1.5. A jegyzőkönyv készítésével kapcsolatos tudnivalók

Minden mérési gyakorlat eredményeit a hallgató az útmutatónak megfelelően a laborfüzetébe rögzíti. Ugyanabba a füzetbe írja az adatok feldolgozását (minimum egy teljes számítást) és az eredmények kiértékelését. Az oktató által nevesített mérési feladatról majd jegyzőkönyvet készít. **A jegyzőkönyv A4 formátumú, olvasható betűkkel, tintával vagy kék színű golyóstollal írott dokumentum.** Amikor a mért adatokat analóg vagy digitális adatgyűjtő nélkül olvassuk le, a grafikus összefüggéseket ceruzával milliméterpapírra készítjük, és beragasztjuk a füzetbe, illetve a leadandó jegyzőkönyvbe. Amikor a mérésekhez adatgyűjtőt és számítógépet használunk, az ábrákat Excel vagy más programok által nyújtott grafikában készítjük el, majd a kinyomtatott ábrákat ráragasztjuk a füzetlapra vagy a leadandó lapra. Minden ábrának, diagramnak és táblázatnak számot és nevet adunk. A diagramok készítése és a számítások elvégzése alkalmával figyelembe vesszük az 1.3. pontban foglaltakat. Minden esetben, amikor a feladat megengedi, a számítási eredményeket táblázatban adjuk meg, miután egy példán bemutattuk a számítás menetét.

A jegyzőkönyvnek tartalmaznia kell:

- a gyakorlat címét;
- a mérés végrehajtásának időpontját;
- mérést végrehajtók nevét;
- a mérés rövid elvi ismertetését;
- a berendezés **ceruzával készített vázlatát**, *megjelölve a mérés szempontjából fontos elemeket, műszereket, és feltüntetve a mérendő mennyiségek jelét;*
- a mérés rövid ismertetését, *leírva az elvégzett gyakorlatot;*
- a mért mennyiségek értékét, táblázatban;
- a mérési adatok feldolgozásának menetét *(egy teljes számítást)*, *bemutatva a felhasznált összefüggéseket, az azokban megjelent mennyiségek nevét és mértékegységét, a behelyettesített adatokat és a számított eredményt; az eredményeket aláhúzzuk;*
- a számított értékek táblázatos összefoglalását;
- a mért, illetve a számított értékek alapján megrajzolt diagramokat;
- a megfogalmazott következtetéseket.

A megírt jegyzőkönyvet a mérést követő hét napon belül aktaborítóban leadjuk a tantárgyfelelősnek, aki értékeli. Elutasítás esetén a mérést megismételjük.



## TRANSPORTFOLYAMATOKKAL KAPCSOLATOS MÉRÉSI GYAKORLATOK

### ÁRAMLÁSI MÉRÉSEK

A gyakorlati útmutató e fejezete az áramlási mérések ismertetésével foglalkozik. A gyakorlatok fő célja az áramlással kapcsolatos ismeretek rögzítése és a gyakorlatban fontos mérési módszerek elsajátítása. Ugyanakkor hangsúlyt fektetünk az adatok feldolgozására is, mind az analitikai, mind a grafikus módszert alkalmazva.

#### 2.1. Az áramlás jellegének gyakorlati vizsgálata. A Reynolds-szám és a kritikus Reynolds-szám meghatározása

Mint ismeretes, a fluidumok (gázok és folyadékok) olyan közegek, amelyek külső erő hatására áramlanak egy adott térben. Az áramlás **hajtóereje a nyomáskülönbség**. Egy bizonyos csőben mozgó fluidum áramlási sebessége mind a közeg mennyiségétől, tulajdonságaitól, mind a cső geometriájától és anyagának felületi megmunkálásától függ. A fluidum és cső belső felülete között fellépő súrlódás hatására a csőben áramló közeg sebességprofilja változó, olyannyira, hogy a falközélen nulla sebességgel, míg a tengelyben maximális sebességgel kell számolni.

Gyakorlatban a folyadékok és a gázok áramlása esetén két áramlási jelleget különböztetünk meg, mégpedig:

- a lamináris (réteges) és
- a turbulens (gomolygó) áramlást.

A lamináris áramlásra jellemző, hogy a folyadéktér minden pontjában a sebességvektor időben állandó, és az áramvonalak, amelyek egyben a folyadék-részecskék pályái is, nem keresztezik egymást. Valódi lamináris áramlást még laboratóriumi szinten is nagyon nehéz beállítani és fenntartani. Amennyiben a főáram a zavaró hatásokat (perturbációkat) csillapítani képes, akkor a lamináris áramlás stabil. Ellenkező esetben a főáram elősegíti, felerősíti a hatást, az áramlás elveszti szabályos mozgásállapotát, és az áramvonalak összekuszálódásával ez turbulens jelleget vesz fel.

Az áramlás jellegének megjelölésére az úgynevezett Reynolds-számot használjuk. Ha a kör keresztmetszetű csőre számított Reynolds-szám (rövidítve  $Re$ ) 2300 alatti, akkor az áramlás lamináris. A gyakorlatban valóságos, kifejlett turbulens áramlásról csak 10 000 feletti  $Re$ -szám esetén beszélünk, ezért az áramlás jellege három tartományra osztható (Bratu 1984a):

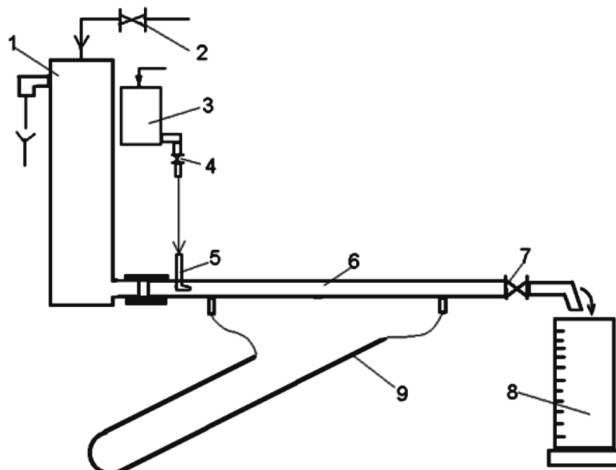
- lamináris:  $Re < 2300$ ;
- átmeneti:  $2300 < Re < 10000$ ;
- turbulens:  $Re > 10000$ .

### A gyakorlat célja:

- az áramlás jellegének szemléltetése és
- a lamináris áramlás megszűntét jelző kritikus  $Re$ -szám meghatározása mérések és számítások alapján.

### A gyakorlati berendezés:

A berendezés egy 28 mm külső átmérőjű, 1,5 mm falvastagságú, 1 m hosszú üvegcsőből áll (6), melynek az egyik végén egy fojtószelep (7) található, a másik vége pedig egy túlfolyóval ellátott tartállyal van összekötve (1). Ugyancsak a berendezés része az oldalcsonkkal ellátott színesfolyadék-tartály (3), az áramlott térfogat meghatározására szolgáló különböző űrmértékű mérőhenger (8) és a nyomásesést mérő U-csöves manométer (9). A berendezés vázlatát a 2.1.1. ábrán látható.



**2.1.1. ábra.** A kísérleti berendezés vázlatát:

- 1 – túlfolyóval ellátott víztartály, 2 – vízcsap, 3 – színesfolyadék-tartály,  
4, 7 – fojtószelep, 5 – adagolócsomók, 6 – üvegcső, 8 – mérőhenger,  
9 – U-csöves manométer.

### Mérési feladat:

Mérés előtt megvizsgáljuk a berendezés állapotát, főleg a csatlakoztatásra szolgáló tömlők minőségét. Miután mindent rendben találtunk, megnyitjuk a (2)-es vízcsapot, s amikor a túlfolyón megjelenik a víz, beállítjuk a nulla szintkülönbséget az U-csöves manométeren, s csak azután kezdhetjük a mérést.

A fojtószelepet a lefolyó fölé helyezzük, és megnyitjuk. Kb. 10-15 s elteltével megnyitjuk a színesfolyadék-adagoló csapot és követjük a színes folyadék áramlási vonalát. Mikor beállítottuk az egyenletes áramlást (a cső tengelyén egy folytonos színes vonal jelenik meg), bemérjük a kifolyó víz térfogatáramát (át-helyezzük a műanyag tömlőt a mérőhengerbe és megindítjuk a kronométert). Miután bemértünk kb. 500-1000 cm<sup>3</sup> vízmennyiséget, leállítjuk a kronométert, és a túlfolyót ismét a lefolyóba helyezzük. Ezután újabb térfogatáramra állítjuk a fojtószelepet, követve a színes folyadék áramlását. Egy újabb mérést végzünk, s ezt megismételjük újabb és újabb fojtószelepálláson. A mérési és számítási adatokat a 2.1.1. táblázatban foglaljuk össze.

**2.1.1. táblázat.** *Mérési és számítási adatok a  $d = \dots$  mm átmérőjű cső esetében*

S.sz.	$V_p$ cm <sup>3</sup>	$\tau$ , s	$T$ , K	$V_r$ , m <sup>3</sup> /s	$w$ , m/s	Re	Áramlás jellege	Megjegyzések
1								

#### A számításhoz szükséges összefüggések:

Térfogatáram:

$$V_r = \frac{V_l}{\tau}, \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (2.1.1)$$

Átlagsebesség:

$$w = \frac{V_r}{A_k}, \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2.1.2)$$

Reynolds-szám:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{w \cdot d}{\frac{\eta}{\rho}} = \frac{\rho \cdot w \cdot d}{\eta} \quad (2.1.3)$$

ahol:  $V_r$  – a számított térfogatáram, m<sup>3</sup>/s;  $V_l$  – a  $\tau$  időegység alatt mért térfogat, cm<sup>3</sup>;  $\nu$  – a víz  $T$  hőmérsékleten mért kinematikai viszkozitása, m<sup>2</sup>/s;  $\eta$  – a víz  $T$  hőmérsékleten mért dinamikai viszkozitása, Pa·s;  $\rho$  – a víz  $T$  hőmérsékleten mért sűrűsége, kg/m<sup>3</sup>;  $w$  – a folyadék átlagsebessége, m/s;  $d$  – a karakterisztikus méret vagy egyenértékű átmérő, m.

A karakterisztikus méret vagy egyenértékű (hidraulikus) átmérő értéke a (2.1.4a)–(2.1.4c) összefüggések valamelyikével számítható ki (Fonyó–Fábrí 2004; Gavrilă–Zichil 2000; Bratu 1984a; Tudose et alii 2001):



$$d = \frac{4 \cdot A_k}{K_n} \quad (2.1.4a)$$

ahol:  $A_k$  – az áramlás irányára merőleges keresztmetszet területe,  $m^2$ ;  $K_n$  – nedvesített kerület,  $m$ .

Amennyiben a keresztmetszet kör alakú és a cső teljes kerülete nedvesített, akkor a cső egyenértékű átmérője megegyezik a geometriai belső átmérővel ( $d_b$ ):

$$d = \frac{4 \cdot \frac{\pi \cdot d_b^2}{4}}{\pi \cdot d_b} = d_b \quad (2.1.4b)$$

Ha csak a külső átmérő ( $d_k$ ) mérhető (szerelt hálózatok esetében), akkor az egyenértékű átmérő kiszámítására ismerni kell a falvastagságot ( $\delta$ ):

$$d = d_b = d_k - 2 \cdot \delta \quad (2.1.4c)$$

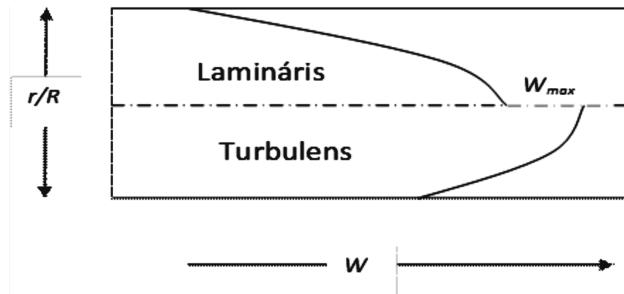
A 2.1.1. táblázat adatainak segítségével meghatározzuk azt a  $Re$ -számot, mely átmenetet képez a lamináris áramlásból a turbulens áramlásba. Ezt **kritikus  $Re$ -számnak** is nevezik.

## 2.2. A csősúrlódási tényező gyakorlati meghatározása

A csőben áramló folyadék sebességprofilja az áramlás jellegétől függően változik. Lamináris áramlásra egy elnyúlt parabolaprofil jellemző, míg a turbulens áramlás esetén a parabolaprofil tompítottabb (lásd a 2.2.1. ábrán feltüntetett félparabola metszeteket).

Az áramlás  $w$  átlagsebessége nem más, mint a térfogatáram és az áramlási keresztmetszet hányadosa, vagyis:

$$w = \frac{V_\tau}{A} = \frac{V_\tau}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}, \text{ m/s} \quad (2.2.1)$$



**2.2.1. ábra.** Az áramlási sebesség profilja lamináris és turbulens áramlás esetén:

$r$  – a tengelytől mért távolság,  $R$  – a tengelytől mért maximális távolság,  
 $w$  – az áramlási sebesség,  $w_{max}$  – a tengelyen mért maximális sebesség

Ismerve a tengelyben mért maximális sebességet, kiszámítható az átlagsebesség. Így az áramlás jellegétől függően használhatjuk a (2.2.2) vagy a (2.2.3) összefüggéseket (Bratu 1984a; Szép–Gavrilă–András 2012).

$$\text{– lamináris áramlaskor: } w = 0,5 \cdot w_{\max} \quad (2.2.2)$$

$$\text{– turbulens áramlaskor: } w = 0,84 \cdot w_{\max} \quad (2.2.3)$$

Az áramló közeg és a cső belső fala között fellépő súrlódás leküzdésére szolgáló erő ( $F$ ) arányos a súrlódási felülettel ( $\pi \cdot d \cdot l$ ) és a térfogategységre vonatkoztatott kinetikai energiával ( $\rho \cdot w^2 / 2$ ) (Fonyó–Fábrı 2004). Az arányossági tényező éppen a súrlódási tényező ( $f$ ):

$$F = f \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (2.2.4)$$

Ezen erő kiszámítható mint a nyomásveszteség és a keresztmetszet szorzata, vagyis:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \Delta p \quad (2.2.5)$$

Ha a Fanning által bevezetett súrlódási tényezőt ( $f$ ) a csősúrlódási tényezővel helyettesítjük ( $\lambda = 4 \cdot f$ ), akkor felírható a Darcy–Weisbach-összefüggés:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot \frac{l}{d} \quad (2.2.6)$$

ahol:  $\Delta p$  – nyomásveszteség, Pa;  $\rho$  – az áramló közeg sűrűsége, kg/m<sup>3</sup>;  $w$  – az áramlás átlagsebessége, m/s;  $d$  – a cső egyenértékű átmérője, m;  $l$  – a cső hossza, m;  $\lambda$  – a csősúrlódási tényező.

Számos kísérleti adat feldolgozása alapján, az áramlás jellegét figyelembe véve, több összefüggést állítottak fel a csősúrlódási együttható és a Re-szám között. Így például a lamináris áramlaskor a (2.2.7) összefüggés érvényes:

$$\lambda = \frac{A^*}{\text{Re}} \quad (2.2.7)$$

ahol: az  $A^*$  együttható, amint a 2.2.1. táblázat is mutatja, függ az áramlási keresztmetszet geometriai alakjától.

**2.2.1. táblázat.** Az  $A^*$  együttható értéke az áramlási keresztmetszet függvényében

Áramlási keresztmetszet	$A^*$	Áramlási keresztmetszet	$A^*$
Kör	64	Téglalap	
Négyzet	57	a/b – nagyon kicsi	96
Egyenlő oldalú háromszög	53	a/b = 0,10	85
Gyűrű	96	a/b = 0,25	73
Ellipszis		a/b = 0,50	62
a/b = 0,10	78	a/b = 1,00	57
a/b = 0,30	73		
a/b = 0,50	68		

Forrás: Gavrilă–Zichil 2000.

Behelyettesítve a Darcy–Weisbach-egyenletbe a (2.2.7) összefüggést a kör keresztmetszet esetén, az úgynevezett Hagen–Poiseuille-egyenletet kapjuk (Bratu 1984; Gavrilă 2002):

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} = \frac{64}{\text{Re}} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} = \frac{64 \cdot \eta}{\rho \cdot w \cdot d} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} = \frac{32 \cdot \eta \cdot l \cdot w}{d^2} \quad (2.2.8)$$

Turbulens és átmeneti jellegű áramláskor, ha a  $4000 < \text{Re} < 100000$ , akkor a sima falú cső esetén a súrlódási együtthatót Blasius összefüggésével számítjuk (Gavrilă–Zichil 2000; Fonyó–Fábrı 2004):

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad (2.2.9)$$

Behelyettesítve a Darcy–Weisbach-egyenletbe, a következő nyomásvesztés-összefüggést kapjuk:

$$\Delta p = \frac{0,1532 \cdot \eta^{0,25} \cdot l \cdot \rho^{0,75} \cdot w^{1,75}}{d^{1,25}} \quad (2.2.10)$$

Nagy Re-szám esetén ( $10^5$  és  $10^8$  között) a csősúrlódási tényezőt Nikuradze összefüggésével is számíthatjuk (Gavrilă–Zichil 2000; Gavrilă 2002):

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}} \quad (2.2.11)$$

Amint a (2.2.8) összefüggés is bizonyítja, lamináris áramláskor a nyomásvesztés sebességfüggvénye lineáris, míg turbulens áramláskor [lásd a (2.2.10) összefüggést] majdnem négyzetes. Amennyiben egyik összefüggés sem illeszkedik jól a mért értékekre, akkor a (2.2.12) összefüggés paramétereit ( $a$ ,  $b$ ) függvény-illesztéssel határozzuk meg:

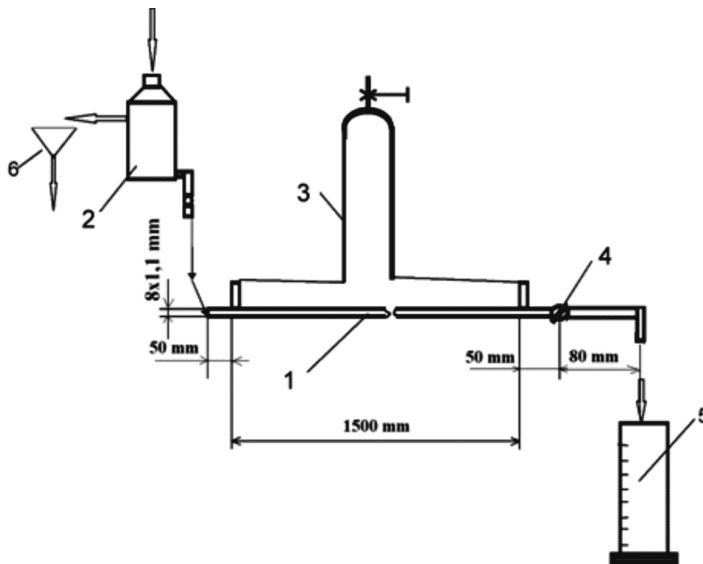
$$\lambda = \frac{a}{\text{Re}^b} \quad (2.2.12)$$

### A gyakorlat célja:

A csősúrlódási tényező meghatározása a nyomásvesztés és az átlagsebesség értékeiből, a mért értékek összehasonlítása a megadott összefüggések segítségével kiszámított értékekkel, valamint egy, az adott rendszer csősúrlódási tényezőjének számítására alkalmas képlet meghatározása nemlineáris függvény illesztésével.

### A kísérleti berendezés:

A berendezés egy 1600 mm hosszú, 8 mm külső, 5,8 mm belső átmérőjű, vízszintes helyzetű, fojtószeleppel rendelkező (4) rézcsőből (1), túlfolyóval ellátott oldalcsonkos tartályból (2), U-csöves manométerből (3) és mérőhengerből (5) tevődik össze (lásd a 2.2.2. ábrát), amelyben az egyenes csövet kigyócsóval is helyettesíthetjük.



**2.2.2. ábra.** A csősúrlódási együttható gyakorlati meghatározására szolgáló berendezés:

1 – rézcső, 2 – túlfolyóval ellátott tartály, 3 – U-csöves manométer,  
4 – fojtócsap, 5 – mérőhenger, 6 – túlfolyó

Mielőtt a méréseket megkezdenénk, ellenőrizzük, hogy a berendezés megfelel-e a mérési feladatnak. Ha mindent rendben találtunk, akkor megnyitjuk a vízcsapot és megvárjuk, míg a túlfolyón megjelenik a víz. Azután az 1500 mm távolságra lévő csonkokhoz csatolt manométert nulla szintkülönbségre állítjuk, erre az U cső felső felén lévő csapot használjuk. Miután beállítottuk a nulla szintkülönbséget, elzárjuk az U-cső csapját. Megnyitjuk a (4)-es fojtócsapot, és miután beáll az U-csöves manométeren az állandó szintkülönbség, meghatározzuk a térfogatáramot, megmérve egy megszabott térfogatmennyiség gyűjtéséhez szükséges időtartamot.

**2.2.2. táblázat.** A mért és a számított értékek

S. sz.	V, mL	$\tau$ , s	$\Delta h$ , mm	T, K	$V_r$ , m <sup>3</sup> /s	w, m/s	Re	$\Delta p$ , Pa	$\lambda$	
									Mért	Számított

A geometriai méretekből, az átáramlott vízmennyiségből, a mért időből és a manométeren leolvasott szintkülönbségből kiszámítjuk a 2.2.2. táblázatnak megfelelő értékeket (térfogatáram, átlagsebesség, Reynolds-szám, csősúrlódási tényező). A számításhoz szükséges összefüggések:

- térfogatáram:  $V_{\tau} = \frac{V}{\tau}$ , m<sup>3</sup>/s
- átlagsebesség:  $w = \frac{V_{\tau}}{A} = \frac{4 \cdot V_{\tau}}{\pi \cdot d^2}$ , m/s
- Re-szám:  $Re = \frac{\rho \cdot w \cdot d}{\eta}$
- nyomásveszteség:  $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$ , Pa
- a mért csősúrlódási tényező:  $\lambda_{mért} = \frac{2 \cdot d \cdot \Delta p}{l \cdot w^2 \cdot \rho}$ ,

amelyekben:  $V$  – a mért térfogat, m<sup>3</sup>;  $w$  – az átlagsebesség, m/s;  $\tau$  – a mért idő, s;  $\eta$  – a víz  $T$  hőmérsékleten mért dinamikus viszkozitása, Pa·s;  $\rho$  – a víz  $T$  hőmérsékleten mért sűrűsége, kg/m<sup>3</sup>;  $\Delta h$  – a mért szintkülönbség, m;  $\Delta p$  – a számított nyomásveszteség, Pa;  $d$  – a cső egyenértékű átmérője, m,  $l$  – a mérőcsonkok közötti távolság, m,  $g$  – gravitációs gyorsulás, 9,81 m/s<sup>2</sup>.

A különböző Re-számon meghatározott (mért és számított) csősúrlódási tényező értékeit  $\lg \lambda \leftrightarrow \lg Re$  koordináta-rendszerben ábrázoljuk, és lineáris regresszióval meghatározzuk a paramétereket. Az ábra segítségével (grafikusan) meghatározzuk a kritikus Re-szám értékét.

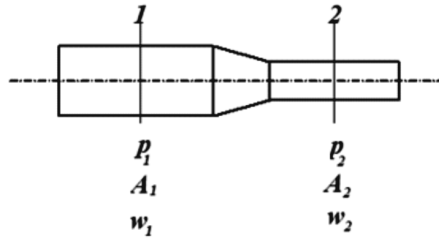
A mérést elvégezhetjük a nemesacél csőkipó esetében is. Az eredményeket az előbbihez hasonló összefüggések segítségével számoljuk, majd táblázatban rögzítjük.

### 2.3. A mérőperem jelleggörbéje

Nagyon sok gyakorlati (laboratóriumi és félüzemi készülék) esetben a beszerelt mérőműszer (rotaméter, kontor stb.) különböző (főleg anyagminőségi vagy korróziós) okból nem felel meg az új közeg térfogatáram-mérésére. Ilyenkor az egyszerűbb felépítésű, általánosabb felhasználhatósággal bíró mérőperemet alkalmaznak.

Mint ismeretes, a mérőperem csőkeresztmetszetet csökkentő szerelés. Ha egy állandó sűrűségű fluidum nyomását mérjük a szűkítés előtt és utána, ismerve mind a két keresztmetszetet, kiszámíthatjuk az áramlási sebességet és a térfogatáramot. Legyen a 2.3.1. ábrán feltüntetett szűkített csőszerelés. Felírjuk Bernoulli egyenletét az 1. és a 2. keresztmetszetre (Fonyó–Fábrí 2004; Szép–Gavrilá–András 2012):

$$\frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 + p_1 = \frac{\rho \cdot w_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_2 + p_2 \quad (2.3.1)$$



**2.3.1. ábra.** Szűkítékes áramlásmérő paraméterei:

$p_1, p_2$  – az 1-es, illetve a 2-es keresztmetszetben mért nyomás;

$A_1, A_2$  – az 1-es és a 2-es keresztmetszet felülete;

$w_1, w_2$  – az 1-es és a 2-es keresztmetszetben mért áramlási sebesség

Tudva, hogy  $h_1 = h_2$  (a cső vízszintes), kiszámítható a nyomáskülönbség és sebességek közti összefüggés:

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 - \frac{\rho \cdot w_2^2}{2} - \rho \cdot g \cdot h_2 = \frac{\rho}{2} \cdot (w_1^2 - w_2^2) \quad (2.3.2)$$

Figyelembe véve a folytonossági tételt és a  $\beta$  kompresszibilitási tényezőt, felírhatjuk az  $A_1$  és  $A_2$  keresztmetszetre az alábbi összefüggést:

$$w_1 \cdot A_1 = w_2 \cdot A_2 \cdot \beta \quad (2.3.3)$$

Ahonnán:

$$w_1 = w_2 \cdot \frac{A_2}{A_1} \cdot \beta \quad (2.3.4)$$

Behelyettesítve a (2.3.2) egyenletbe, a következő összefüggést kapjuk:

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot w_2^2}{2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \beta \right)^2 \right] \quad (2.3.5)$$

Innen kiszámítható a sebesség értéke:

$$w = \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \beta \right)^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2.3.6)$$

A meghatározott sebesség segítségével kiszámítható a közeg térfogatárama:

$$V_\tau = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \beta \right)^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2.3.7)$$

A kör keresztmetszetű,  $D_o$  átfolyási átmérőjű, csőbe szerelt mérőperem esetén nagyon nehéz meghatározni az átfolyó folyadék keresztmetszetét. Épp ezért a valós sebesség értékét a következő korrigált összefüggés írja le:

$$w_{2k} = \phi \cdot w_2 \quad (2.3.8)$$

Ismerve a mérőperem előtti folyadékáram  $A_1$  keresztmetszetét, a mérőperem  $D_o$ -nak megfelelő  $A_o$  keresztmetszetét és a mérőperem utáni cső  $A_2$  keresztmetszetét, az  $A_2/A_1$  arány felírható:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{A_2}{A_o} \cdot \frac{A_o}{A_1} \quad (2.3.9)$$

Tehát a perem utáni folyadék valós sebességét a következőképpen írhatjuk fel:

$$w_{2k} = \frac{\phi}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_o}\right)^2 \cdot \left(\frac{A_o}{A_1}\right)^2 \cdot \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2.3.10)$$

A folyadék térfogatáramát pedig a (2.3.11) összefüggés írja le:

$$V_\tau = A_o \cdot w_{2k} = \frac{\phi}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_o}\right)^2 \cdot \left(\frac{A_o}{A_1}\right)^2 \cdot \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \cdot \frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \quad (2.3.11)$$

A vizet összenyomhatatlannak tekintve ( $\beta = 1$ ) és az átfolyási számot bevezetve ( $\alpha_m$ ) a következő összefüggést kapjuk:

$$V_\tau = A_o \cdot w_{2k} = \alpha_m \cdot \frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (2.3.12)$$

Az  $\alpha_m$  átfolyási szám értéke függ a szűkítési átmérő és a csőátmérő arányától. Tehát ha az átfolyási szám ismert bármely  $\Delta p$  értékre, akkor bármikor kiszámítható a térfogatáram.

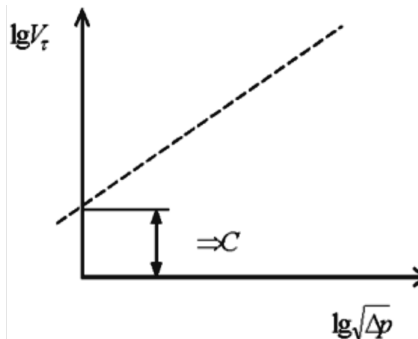
Átrendezve a (2.3.12) összefüggést, felírhatjuk:

$$V_\tau = \alpha_m \cdot \frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{\Delta p} = C \cdot \sqrt{\Delta p}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (2.3.13)$$

Amennyiben a  $V_\tau$  értékeit a  $\sqrt{\Delta p}$  függvényében ábrázoljuk, az így kapott egyenes meredeksége a mérőperem karakterisztikájának értékét adja meg.

Hasonlóan, ha logaritmáljuk a (2.3.13) egyenletet, a következő összefüggést kapjuk:

$$\lg V_\tau = \lg C + \lg \sqrt{\Delta p} \quad (2.3.14)$$



**2.3.2. ábra.** A mérési eredmények ábrázolása  $\lg$ - $\lg$  koordináta-rendszerben

Ha a mért  $V_r$  és  $\Delta p$  értékekből kiszámítjuk a  $\lg V_r$  és a  $\lg \sqrt{\Delta p}$  értékeket, majd megszerkesztjük a  $\lg$ - $\lg$  diagramot (lásd a 2.3.2. ábrát), a tengelymetszetből megkapjuk a  $C$  értékét, amiből kiszámítható az  $\alpha_m$  átfolyási szám.

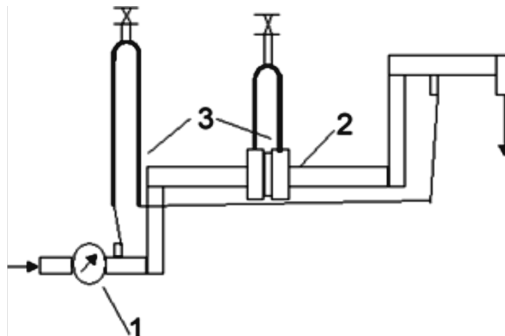
### A gyakorlat célja:

Elsajátítani egy mérőperem kalibrálási görbéjének a megszerkesztési módját.

### A mérési berendezés:

A mérés megvalósítására a 2.3.3. ábrán vázlat formájában bemutatott berendezést alkalmazzuk. A berendezés tartalmaz egy mérőperemet (2), egy vízórát (1) és két U-csöves manométert (3), melyek közül az egyik a mérőperem nyomásvesztését, a másik a hálózat nyomásvesztését méri.

A vízóra kalibrálására használhatunk rotamétert (lebegőtestes áramlásmérőt), mérőhengert vagy más szabványos köböző edényt.



**2.3.3. ábra.** A mérőperem jelleggörbéjének megszerkesztésére alkalmas berendezés vázlata:

1 – vízóra, 2 – mérőperem, 3 – U-csöves manométer

### Mérési feladat:

Mielőtt a berendezést beindítanánk, elvégezzük a készülék légtelenítését, megnyitva a vízóra közelében lévő csapot.

A szabályozószelepek segítségével az U-manométerek folyadék-szintkülönbségét nullára állítjuk. Beállítjuk az első vízáramot, majd leolvassuk a manométerek kijelzőjét. A térfogatáram meghatározására vízórát és rotamétert egyaránt használunk.

A vízóra esetén először leolvassuk a vízóra kijelzőjét, és rögtön megindítjuk a kronométert. Bizonyos idő (60-90 s) elteltével újból leolvassuk a vízóra kijelzőjét, és lejegyezzük az eltelt idővel együtt. Ezt háromszor megismételjük,



és meghatározzuk az azonos intervallumnak megfelelő átlagtérfogat értékét. Az értékeket táblázatban rögzítjük (2.3.1. táblázat).

A rotaméter esetén egyszerűen leolvassuk az úszó szabad lapja által jelölt térfogatáramot. A térfogatáram mérése után újra felveszünk egy újabb térfogatáramot, jobban kinyitva a fojtócsapot. Újra elvégzünk egy mérést. Ezt megismételjük legalább 7-szer.

**2.3.1. táblázat.** Mért és számított értékek

S. sz.	$\Delta h$ , mm	$\tau$ , s	Vízóra állása adatok, L			$V_h$ , cm <sup>3</sup>	$V_\tau$ , m <sup>3</sup> /s		$\lg V_\tau$		$\Delta p$ , Pa	$\lg \sqrt{\Delta p}$
			Kezdeti	Végző	Különbség		V.O.	H.	V.O.	H.		

V.O. – vízóra, H – henger

**A számításhoz szükséges összefüggések:**

$$- V_\tau = \frac{V_{atl}}{\tau} \text{ vagy } V_\tau = \frac{V_H}{\tau}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (2.3.15)$$

ahol:  $V_{atl}$ ,  $V_H$  – a vízórával mért átlagtérfogat, illetve a köbözés útján kapott térfogat (a hengerrel mért térfogat), m<sup>3</sup>.

$$- \Delta p = \Delta h \cdot g \cdot (\rho_m - \rho) \quad (2.3.16)$$

ahol:  $\Delta h$  – a peremhez illesztett manométeren mért szintkülönbség, m;  $\rho_m$ ,  $\rho$  – az U-csöves manométerben levő folyadék, illetve a közeg sűrűsége, kg/m<sup>3</sup>;  $g$  – gravitációs állandó, 9,81 m/s<sup>2</sup>.

A kiszámított értékekkel külön-külön ábrázoljuk a lg-lg diagramot, és a metszéből kiszámítjuk a  $C$  értékét. A számított értékkel meghatározzuk az  $\alpha_m$  átfolyási számot:

$$\alpha_m = \frac{C}{\frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \quad (2.3.17)$$

Az átfolyási szám értékével, minden mért nyomásveszteségre, a (2.3.13) összefüggéssel kiszámítjuk a térfogatáramot, és megrajzoljuk a mérőperem jelleg-görbét.

## 2.4. A csőhálózat áramlási ellenállásának gyakorlati meghatározása

A fluidumok áramlását a folyás irányának megfelelő aktív erő biztosítja. Ezzel az erővel ellentétesen, az áramlást akadályozóan hat a súrlódási, geometriai és a helyi ellenállás. Míg a súrlódási ellenállás a folyadékréteg és a cső belső fala között lép fel, a helyi ellenállást az áramlás irányának a megváltoztatása eredményezi. Az áramlás keresztmetszetének a változása, a könyök, a T vagy Y elosztó, szabályzó szelep stb. mind befolyásolja az áramlás térfogatáramát. Az áramlást fékező különböző ellenállások nagy nyomásvesztést idéznek elő. Ahogy a Darcy–Weisbach-összefüggés is mutatja, a nyomásvesztés arányos az áramló közeg kinetikai energiájával és az áramlási tér hosszúság–keresztmetszet arányával. A hálózat nyomásvesztése meghatározható a Darcy–Weisbach-összefüggés segítségével, ha abban a hosszúság helyett az egyenértékű hosszúságot ( $L_e$ ) helyettesítjük (Tudose 2000; Tudose et alii 2001):

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot \frac{L_e}{d} \quad (2.4.1)$$

Az egyenes csővezeték egyenértékű hosszát ( $L_e$ ) egy ellenállás esetén  $n$  állandó és  $d$  átmérő szorzatával, több ellenállás esetén pedig a szorzatok összegével ( $L_e = d \cdot \sum n_i$ ) lehet helyettesíteni. Az  $n$  értékeiről a különböző kézikönyvek nyújtanak felvilágosítást. A 2.4.1. táblázat néhány  $n$  értéket tartalmaz különböző helyi ellenállások esetén.

**2.4.1. táblázat.** Az  $n$  értéke néhány helyi ellenállás esetén

Helyi ellenállás		$n$
45° könyök		15
90° könyök	76–152 mm átmérő esetén	30
	178–252 mm átmérő esetén	40
90° derékszögű könyök		50
T kifolyó elosztó		90
T gyűjtő elosztó		60
Szelep		60–300
Térfogatáram-mérő (forgó)		200–300
Zárcsap		10–15
Nyitott tolattyús szelep		7

Forrás: Gavrilă–Zichil 2000.

A nem egyenes csövekben a súrlódási veszteség nagyobb. Így például a cső-kígyóban a nyomásvesztést az alábbi összefüggés alapján számítjuk ki (Pavlov–Romankov–Noszkov 1972; Gavrilă–Zichil 2000):

$$\Delta p = \left(1 + 3,54 \cdot \frac{d}{D}\right) \cdot \lambda \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot \frac{l}{d} \quad (2.4.2)$$

ahol:  $D$  – a kigyócső menetátmérője, m,  $d$  – a csőkígyó csövének átmérője, m.

A mérések alkalmával meghatározható a csőhálózatban szereplő mindenféle ellenállás szerepe az energiamérlegben. Így például ha a mérőperem szerepét akarjuk meghatározni, megmérjük a nyomásveszteség értékét, vagyis az U-csöves manométer által jelzett  $\Delta h$  szintkülönbséget. Ez alapján kiszámítható a perem veszteségtényezője ( $\zeta$ ).

Tudva, hogy a nyomásveszteség arányos a szintkülönbséggel, illetve a folyadék kinetikai (mozgási) energiájával, fel lehet írni:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (2.4.3)$$

Innen kiemelve a  $\Delta h$ -t:

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad (2.4.4)$$

A nyomásveszteséget felírhatjuk mint a veszteségtényező és a kinetikai energia szorzatát:

$$\Delta p = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (2.4.5)$$

A (2.4.4) és (2.4.5) összefüggésekből kifejezhetjük a veszteségtényezőt:

$$\zeta = \Delta h \cdot \frac{2 \cdot g}{w^2} \quad (2.4.6)$$

Ezt alkalmazva minden helyi ellenállásra, kiszámítható a Re-szám függvényében a veszteségtényező.

### A mérés célja:

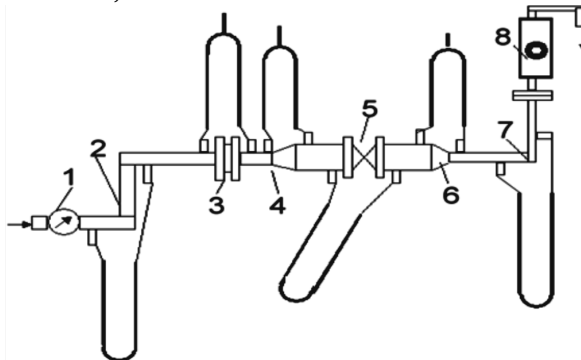
A csőhálózatba épített elemek veszteségtényezőjének meghatározása, az összes nyomásveszteség mért és számított értékeinek összehasonlítása.

### A gyakorlati berendezés:

A laboratóriumi berendezés (lásd a 2.4.1. ábrát) egy csőszerelvényből áll, melybe két egyenes könyök, egy mérőperem, egy tágulat, egy szűkület, egy csap és egy görbekönyök van beépítve. A térfogatáram meghatározása céljából a szerelvény tartalmaz egy vízórárt és egy rotamétert.

Mielőtt a mérést megkezdénénk, megfigyeljük, hogy a berendezés megfelel-e a feladatnak. Azután nullára állítjuk az U-csöves manométerek folyadék-szintkülönbségét. Ezt követően rátérünk a mérés végrehajtására. Növekvő csapnyitással felvesszünk különböző folyadékáramokat, s miután beállott a stacionárius állapot (az U-csöves manométerek konstans szintkülönbséget mutatnak), leolvassuk az ellenállásoknak megfelelő szintkülönbségeket. Ezután, kb. 30 s intervallumokban egymás után legalább 4-szer leolvassuk a vízórárt átfolyt víz térfogatát és

a megfelelő időtartamot. A mérési eredményeket táblázatban rögzítjük (lásd a 2.4.2–2.4.5. táblázatokat).



**2.4.1. ábra.** A csőszerelvény veszteségtényezőjének gyakorlati meghatározása:

1 – vízóra, 2 – két 90° egyenes könyök, 3 – mérőperem, 4 – tágulat,  
5 – csap, 6 – szűkület, 7 – 90° görbekönyök, 8 – rotaméter

**2.4.2. táblázat.** Mérési és számítási adatok

Sorszám	Térfogatáram			
	$V_k, L$	$V_p, L$	$\tau, s$	$V_c, m^3/s$

**2.4.3. táblázat.** Mérési és számítási adatok

Mérés helye							
Dupla könyök				Mérőperem			
$w, m/s$	Re	$\Delta h, mm$	$\zeta$	$w, m/s$	Re	$\Delta h, mm$	$\zeta$

**2.4.4. táblázat.** Mérési és számítási adatok

Mérés helye							
Fojtócsap				Szűkület			
$w, m/s$	Re	$\Delta h, mm$	$\zeta$	$w, m/s$	Re	$\Delta h, mm$	$\zeta$

**2.4.5. táblázat.** Mérési és számítási adatok

Mérés helye			
Csőszerelvény			
$\Delta h, mm$	$\Delta p, Pa$		Össz $\zeta$
	Mért	Számított	

Számításhoz szükséges összefüggések:

–  $V_r = \frac{V_f - V_k}{\Delta\tau}$ , m<sup>3</sup>/s – a vízórán  $\Delta\tau$  időközökben leolvasott kezdeti és végső térfogatértékek m<sup>3</sup>-ben kifejezve;

–  $w = \frac{4 \cdot V_r}{\pi \cdot d^2}$ , m/s – az átlagsebesség értéke a helyi ellenállásban;

–  $Re = \frac{\rho \cdot w \cdot d}{\eta}$  – a helyi ellenállásnak megfelelő Re-szám,

–  $\zeta = \Delta h \cdot \frac{2 \cdot g}{w^2}$  – a helyi ellenállási tényező,

–  $\Delta p_{sz} = \sum_i \lambda_i(Re) \cdot \frac{l + L_{e,i}}{d_i} \cdot \rho \cdot \frac{w_i^2}{2}$ , Pa – a számított nyomásveszteség

értéke, ahol: a  $\lambda_i(Re)$  csőszűrlődési tényezőt a Re-szám függvényében számítjuk minden egyes szakasznak ( $i$ ) megfelelő átmérőnél ( $d_i$ ), egyenértékű hosszúságnál ( $L_{e,i}$ ) és sebességnél ( $w_i$ ).

A táblázatok adataival megrajzoljuk minden egyes elem  $\zeta \leftrightarrow Re$  görbéit, és a számított és mért nyomásvesztés-görbét a Re-szám átlagának függvényében.

## 2.5. A töltött és a fluidizációs réteg áramlási nyomásveszteségének gyakorlati vizsgálata

Ipari és laboratóriumi folyamatok lebonyolítására gyakran alkalmaznak olyan készülékeket, melyeknek belsejét, különböző okból, különleges alakú részecskékkel töltik ki. Ezek a részecskék lehetnek inerte vagy reaktívak. Ha nem reagensként vesznek részt a folyamatban, szerepük a fázisok érintkezési felületének növelése (például gázmosásnál). Sok esetben a részecskék más szerepet is kapnak, külső vagy belső felületük aktivitását kihasználva. Ilyenek például az ioncserélő, az adszorbens vagy katalizátor-töltetek. Egyes esetekben a részecskék nyersanyagként szerepelnek a folyamatban, mint például a mészkő termikus bontrása („mészégetés”). Ilyen ipari készülékek az abszorpciós, desztillációs, extrakciós, adszorpciós-deszorpciós, katalitikus és ioncserélős kolonnák. Ebbe a csoportba sorolható még a különböző szemcsehalmazon végzett szűrési művelet is.

Ezekben a műveletekben a fluidum (folytonos fázis) a szemcsék közötti szabad hézagokban áramlik. Ha az áramló közeg nem mozditja meg a részecskéket, akkor azt **töltött rétegnek/ágynak** nevezzük, de ha valamilyen módon lazítja azt, akkor **lazított** vagy **bolygatott töltetnek** nevezzük. Nagyobb áramlási sebesség esetén a töltet **fluidizált állapotba** kerül. Fluidizált állapotban lévő szilárd-fluid rendszerek esetében mind a hőátadási, mind a komponensátadási tényező ugrásszerűen megnő a töltött rétegben mért tényezőhöz viszonyítva. Épp ezért

alkalmas a fluidizált állapot a gyors hűtésre, fűtésre vagy elemi transzportfolyamatok által kontrollált reakciók lebonyolítására.

Abban az esetben, ha tovább növeljük az áramló közeg sebességét, a még nagyobb energiával áramló fluidum elszállítja a töltetet alkotó részecskéket (pneumatikus vagy hidraulikus transzport).

Korábban már láttuk, hogy az üres csőben a súrlódási ellenállás függ a cső hosszától, keresztmetszetétől és a közeg kinetikai energiájától. Várhatóan a töltött csőben, ahol a töltet többszöri irányváltoztatásra kényszeríti a fluidumot, a nyomásesés még nagyobb lesz, és jobban függ az áramlás jellegétől, mint az üres csőben.

Például a réteges áramlás esetén, a Hagen–Poiseuille-képletbe behelyettesítve az üres csőre vonatkoztatott sebességet ( $w/\varepsilon$ ) és az átmérő helyett az egyenértékű átmérőt ( $d_e$ ) használva, az alábbi összefüggést kapjuk (Fonyó–Fábrí 2004):

$$\Delta p = \frac{32 \cdot \eta \cdot L}{d^2} \cdot v = \frac{32 \cdot \eta \cdot L}{d_e^2} \cdot \frac{w}{\varepsilon} \quad (2.5.1)$$

ahol:  $d$  – az áramlási keresztmetszet, m;  $d_e$  – a töltetre vonatkoztatott egyenértékű átmérő, m;  $v$  – átlagos sebesség, m/s;  $w$  – az üres csőre vonatkoztatott sebesség, m/s;  $L$  – a töltet áramlásirányi mérete, m;  $\eta$  – a fluidum dinamikai viszkozitása, Pa·s;  $\varepsilon$  – a töltet porozitása,  $m^3/m^3$ .

Figyelembe véve az egyenértékű átmérő Kozeny-féle megfogalmazását (Fonyó–Fábrí 2004) és beszorozva a tört nevezőjét és a számlálóját is a csőátmérő ( $D$ ) értékével, felírható:

$$\begin{aligned} d_e &= 4 \cdot \frac{\text{áramlási keresztmetszet}}{\text{nedvesített kerület}} \cdot \frac{D}{D} = 4 \cdot \frac{\text{hézagtérfogat}}{\text{nedvesített felület}} = \\ &= 4 \cdot \frac{\text{teljes térfogat}}{\text{nedvesített felület}} = 4 \cdot \frac{\varepsilon}{\sigma} = 4 \cdot \frac{\varepsilon}{a \cdot (1 - \varepsilon)}, \text{ m} \end{aligned} \quad (2.5.2)$$

ahol:  $a$  – a részecske fajlagos felülete,  $m^2/m^3$ ;  $\sigma$  – a töltet fajlagos felülete,  $m^2/m^3$ .

Behelyettesítve a  $d_e$ -t a (2.5.1) összefüggésbe, következik:

$$\Delta p = \frac{32 \cdot \eta \cdot L}{d_e^2} \cdot \frac{w}{\varepsilon} = \frac{32 \cdot \eta \cdot L}{\left( \frac{4 \cdot \varepsilon}{a \cdot (1 - \varepsilon)} \right)^2} \cdot \frac{w}{\varepsilon} \quad (2.5.3)$$

Gömb alakú részecskék esetén a fajlagos felület értéke:

$$a = \frac{\text{részecske felülete}}{\text{részecske térfogata}} = \frac{\pi \cdot d_p^2}{\frac{\pi \cdot d_p^3}{6}} = \frac{6}{d_p} \quad (2.5.4)$$

Behelyettesítve a (2.5.3) összefüggésbe, következik:

$$\Delta p = \frac{32 \cdot \eta \cdot L}{16} \cdot \frac{w}{\varepsilon^3} \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot 6 \cdot d_p^{-2} = K \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\eta \cdot L \cdot w}{d_p^2} \quad (2.5.5)$$

A kísérleti úton mért  $K$  érték 150, így a nyomásvesztés a (2.5.6) összefüggés írja le:

$$\Delta p = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\eta \cdot L \cdot w}{d_p^2} \quad (2.5.6)$$

Ha az áramlás turbulens, akkor a Darcy–Weisbach-egyenletből kiindulva és a  $d$ -t  $d_e$ -vel helyettesítve, felírható:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} = \lambda \cdot \frac{L}{d_e} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} = \lambda \cdot \frac{L}{\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{d_p}{6}} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (2.5.7)$$

A kísérleti alapon meghatározott együttható értéke  $2 \times 1,75$ , tehát az összefüggés formája:

$$\Delta p = 3,5 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{L}{d_p} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (2.5.8)$$

A lamináris és turbulens tartományban egyaránt alkalmas az Ergun-összefüggés (Fonyó–Fábrí 2004):

$$\Delta p = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{L}{d_p} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot \left( 1,75 + 150 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\text{Re}_p} \right) \quad (2.5.9)$$

Tudva, hogy  $Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2}$ , a (2.5.9) összefüggés az alábbi alakban is felírható:

$$Eu = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{L}{d_p} \cdot \left( 1,75 + 150 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\text{Re}_p} \right) \quad (2.5.10)$$

Természetesen a nyomásvesztés nemcsak a töltet relatív hézagterfogatától ( $\varepsilon$ ) és a fajlagos felületétől ( $a$ ) függ, hanem a töltettestnek a geometriai formája, felületének érdessége, sőt nedves vagy száraz állapota is befolyásolja. Míg a szabályos formájú részecskék esetén elég nagy pontossággal számítható a nyomásvesztés, szabálytalan testek nyomásesésének pontosabb meghatározására ajánlottabb a nyomásesés mérése.

### 2.5.1. Töltött oszlop (száraz és nedves) nyomásvesztésének gyakorlati meghatározása

Különböző alakú testekkel töltött oszlopokat (kolonnákat) főleg az abszorpció, deszorpció és rektifikálás műveletekben alkalmazzák. Ilyen oszlopokban a tölteten két fluidum áramlik át ellenáramban, az egyik folyadék, a másik pedig gáz. A gázáram nyomásesését a töltőtestek alakja, mérete, a töltet magas-

sága, de természetesen a folyadékfilm is befolyásolja. A töltet állhat szabályos vagy szabálytalan szilárd testekből, vagy lehet szabályos, rendezett szerkezetű. A szabálytalan testek különböző alakúak lehetnek, mint például a homok, a kavics, a kokszzemcsék. Szabályos testek lehetnek gömb, henger, gyűrű, spirál, nyereg vagy más komplex alakúak. Ezen utolsó csoportba soroljuk a Raschig és a Pall gyűrűket, a Berl és Intalox nyergeket. A legismertebb rendezett töltetek a kerámiából készült Impuls töltet, a fémből gyártott Sulzer töltet, a fém vagy műanyag Mellapak töltet, a kerámia Kerapak és az expandált Pyrapak töltet (Fonyó-Fábrí 2004; Gavrilă-Zichil 2000).

Minden töltettípust a következő tulajdonságok jellemzik:

- geometriai méret (például a gyűrűk esetében az átmérő, magasság és falvastagság);
- fajlagos felület,  $a$  vagy  $\sigma$ ,  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ;
- relatív hézagterefogat (vagy porozitás),  $\varepsilon$ ,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;
- egységnyi magasságra számított nyomásvesztés,  $\Delta p/L$ ,  $\text{Pa}/\text{m}$ ;
- fajlagos tömeg,  $\rho$ ,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

### A gyakorlat célja:

Töltött oszlop mért és számított nyomásvesztésének összehasonlítása.

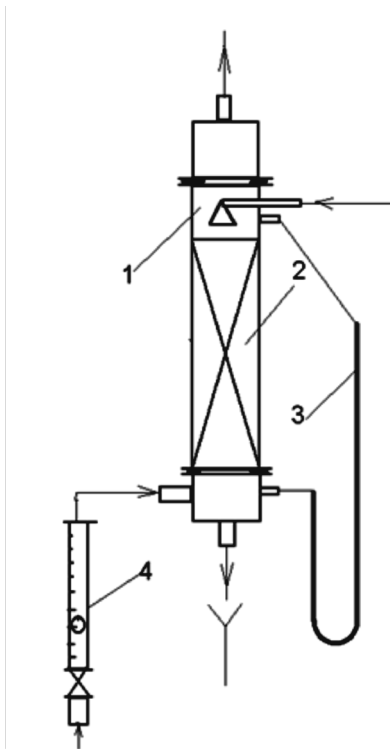
### A mérési berendezés felépítése:

A mérésekhez a 2.5.1. ábrán bemutatott berendezést használjuk két különböző munkavitelben, száraz töltet és különböző locsolási térfogatáram esetén. A készülék egy locsolóval (1) ellátott üvegcsőből készült gyűrűvel töltött oszlop-ból (2), egy manométerből (3) és egy gáz-rotaméterből (4) áll. A locsolási térfogatáram meghatározására köbözési módszer alkalmazunk, megmérve az egységnyi idő alatt kifolyt folyadék térfogatát. A készüléket egy Y elágazáson keresztül összekapcsoljuk a szivattyú kivezető csónkjával.

A szabad ágon lévő fojtószelep segítségével növekvő gáz-térfogatáramot állítunk be, amelyet gáz-rotaméterrel mérünk.

A nyomásvesztés-mérések megkezdése előtt jellemezzük a töltőtestet, meghatározva annak átmérőjét, magasságát és falvastagságát, ömlesztett sűrűségét. Míg az első három mennyiség meghatározására digitális tolómércét, az ömlesztett sűrűség mérésére egy – a kolonna átmérővel megegyező – mérőhengert és kéttizedes pontosságú technikai mérleget használunk. A mérési adatokból kiszámítható a fajfelület és a töltetporozitás ( $\varepsilon = 1 - \rho_s / \rho_r$ ).





### 2.5.1. ábra.

A mérőberendezés vázlatja:

1 – locsoló, 2 – töltött oszlop (60 x 5 mm),  
3 – U-csöves manométer, 4 – gáz-rotaméter

Miután a stacionárius állapot beállt, leolvassuk az U-csöves manométer szintkülönbségét. A mért értékeket a 2.5.1. táblázatban rögzítjük.

A száraz, szabálytalan töltet nyomásvesztését Ergun, míg a szabályos töltetet Kasatkin–Akonian (2.5.11) összefüggésével számítjuk (Pavlov–Romankov–Noszkov 1972):

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d_e} \cdot \frac{\rho_g \cdot w_g^2}{2 \cdot \varepsilon^2} \quad (2.5.11)$$

ahol:  $d_e = 4 \frac{\varepsilon}{\sigma}$  – a töltet egyenértékű átmérője, m;  $\rho_g$  – a gáz (levegő) sűrűsége,

kg/m<sup>3</sup>;  $w_g$  – a gáz (levegő) üres csőre számított sebessége, m/s;  $\varepsilon$  – a töltet porozitása, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;  $\lambda$  – a súrlódási tényező;  $\sigma$  – a töltet egységnyi térfogatra számított felülete, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

**2.5.1. táblázat.** *A száraz töltet esetén mért és számított értékek*

Sz.	$V_R$ , L/h	$w_g$ , m/s	Re	$\Delta h$ , mm	Nyomásveszteség, Pa		
					Mért	Számított	Különbség

Az ömlesztett gyűrűk esetében a Re-szám ( $Re = \frac{4 \cdot w_g \cdot \rho \cdot \varepsilon}{\sigma \cdot \eta}$ ) függvényében számítjuk a súrlódási tényezőt, és pedig:

$$\text{ha } Re < 40, \text{ akkor } \lambda = 140/Re \quad (2.5.12)$$

$$\text{ha } Re > 40, \text{ akkor } \lambda = 16/Re^{0.2} \quad (2.5.13)$$

Nedves töltet esetén először beállítjuk a locsoló térfogatáramot, és azután mérjük a nyomásveszteséget növekvő térfogatárammal az elárasztás eléréséig. Ezután megváltoztatott vízárammal két újabb mérést végzünk. Az eredményeket táblázatban rögzítjük (lásd a 2.5.2. táblázatot).

**2.5.2. táblázat.** *Nedves töltet esetén mért és számított nyomásveszteség*

$$L = \dots$$

Sz.	$V_R$ , L/h	$w_g$ , m/s	$Re_g$	$\Delta h$ , mm	Nyomásveszteség, Pa			
					Mért	Számított		$\frac{\Delta p_{mért}}{\Delta p_{szám}}$
						Száraz töltet	Nedves töltet	

A számításhoz a Léva-féle (Fonyó-Fábrí 2004) (2.5.14) összefüggést alkalmazzuk:

$$\Delta p = \alpha \cdot 10^{\beta \cdot L} \cdot \frac{M_g^2}{\rho_g} \quad (2.5.14)$$

ahol:  $\alpha$  és  $\beta$  – a töltettől függő állandók,  $M_g$  – a gáz,  $L$  – a folyadék tömeg-áram-sűrűségei (a töltet egységnyi keresztmetszetére vonatkoztatott tömegáramok),  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .

Kerámiából készült közepes méretű Raschig gyűrűk esetében az  $\alpha$  és  $\beta$  értékeit a 2.5.3. táblázat tartalmazza.

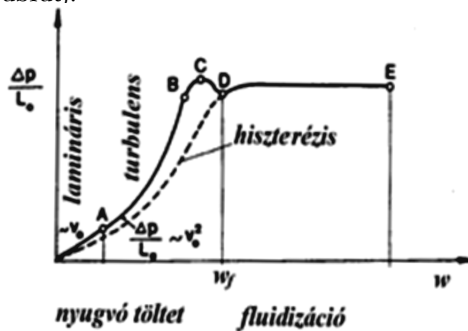
**2.5.3. táblázat.** Az  $\alpha$  és  $\beta$  értékei Raschig gyűrűk esetén

Méret, mm	$\varepsilon$	$\alpha$ , 1/m	$\beta$ , m <sup>2</sup> /kgs
13	0,64	10,00	0,100
25	0,73	2,20	0,045
51	0,75	1,00	0,030
76	0,75	0,74	0,031

Forrás: Fonyó-Fábrí 2004.

### 2.5.2. A fluidizációs töltet nyomásvesztésének mérése

Ha a szabadon helyezett töltetet tartalmazó oszlopba az áramló közeg üres csőre vonatkoztatott sebességét növeljük, egy bizonyos érték után azt tapasztaljuk, hogy a részecskék közti tér megnövekszik, lazulást észlelünk, majd nagyobb áramlási sebességnél a forráshoz hasonló részecskemozgást figyelhetünk meg. A töltet viselkedését a legjobban a  $\Delta p \leftrightarrow w$  (nyomásvesztés–sebesség) görbe írja le (lásd a 2.5.2. ábrát).



(Fonyó-Fábrí 2004)

**2.5.2. ábra.** A töltött oszlopok nyomásvesztése és a fluidizáció

A nyugvó töltött ágy lamináris tartományában, amint az az Ergun-képletből is látható, a nyomásvesztés arányos a sebességgel. Tehát ezen a szakaszon a  $\Delta p \leftrightarrow w$  függvény egy egyenesnek felel meg. A sebesség növelésével az áramlás jellege turbulenssé válik, és a nyomásvesztés a sebesség négyzetével növekedik (A pont). Miután a sebesség eléri azt az értéket, amikor a számított sűrűlési nyomásesés megegyezik az 1 m<sup>2</sup> felületre eső archimédeszi súllyal, a részecskék elmozdulnak (B pont), és a nyomásvesztés már nem nő nagymértékben a sebesség növekedésével. Ha a sebességet növeljük, a nyomásvesztés nő, és eléri a maximális értéket (C pont). Ettől kezdve a nyomásvesztés csökken, hisz a fellazulás nagyobb mértékben csökkenti az ellenállást, mint ahogy a sebesség azt növelné. További sebességnöveléssel nem kezdődik meg a szállítás mindaddig, míg el nem érjük az ülepedési sebességnek megfelelő végsebességet.

A fluidizációs tartományban a részecskék állandó mozgásban vannak, az áramlattal felfelé haladva, majd a gravitáció hatására visszaesnek az ágyba. Mivel a töltet semmilyen rendeződést nem szenved e tartományban, a nyomásvesztés gyakorlatilag állandó. Ha a végsebességet túllépjük, akkor megkezdődik a kihordás, a részecskék elhagyják a fluidizációs ágyat, és a fluidumot követve elszállítódnak.

A cseppfolyós fluidum esetében, a sebesség növelésével megkezdődik a fel-lazulás és a részecskék turbulens mozgása. A fluidizált állapotban a részecskék oly szabadon mozognak, mint a gázfázisban a molekulák. Épp ezért ezt a fajta fluidizációt *homogén fluidizációnak* nevezzük (Fonyó–Fábri 2004).

Ellentétben a folyadékban keletkező fluidizációtól, gázközeggel végzett kísérletek azt bizonyítják, hogy itt nagyon ritka a homogén fluidizációs állapot, inkább az inhomogén fluidizáció áll fenn, mely lehet csatornás, buborékos vagy dugattyú-réteges. A két fluidizáció közötti határt a **Froude**-szám ( $Fr = \frac{w^2}{d \cdot g}$ ) szabja meg. Ha a *Fr*-szám kisebb mint 1, homogén fluidizációról beszélünk, ha pedig nagyobb mint 1, akkor inhomogén fluidizációval állunk szemben (Fonyó–Fábri 2004).

A fluidizációs sebesség számítására a töltetellenállásból származó erőt egyeztetjük a töltet archimédeszi súlyával. Tehát a nyomásvesztés értéke (Fonyó–Fábri 2004):

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{\text{archimédeszi súly}}{\text{keresztmetszet}} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{(\rho_R - \rho_{fl}) \cdot V \cdot g}{A} = \\ &= \frac{L \cdot A \cdot (1 - \varepsilon)}{A} \cdot (\rho_R - \rho_{fl}) \cdot g = L \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_R - \rho_{fl}) \cdot g \end{aligned} \quad (2.5.15)$$

A kritikus sebesség értékét a következőképpen számítjuk ki:

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot (\rho_R - \rho_{fl}) \cdot g = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \rho_{fl} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \zeta \quad (2.5.16)$$

Ha a súrlódási tényező értéke megfelel a **24/Re** értéknek, akkor a kritikus sebesség (Bratu 1984):

$$w_k = \frac{d^2 \cdot g \cdot (\rho_R - \rho_{fl})}{18 \cdot \eta_{fl}} \quad (2.5.17)$$

### A gyakorlat célja:

A fluidizáció gyakorlati megvalósítása és a nyomásvesztés mért és számított értékeinek összehasonlítása.

### A gyakorlati berendezés:

A mérésekhez a 2.5.3. ábrának megfelelő berendezést használjuk. A berendezés tartalmaz egy rotamétert (1), két manométert (4, 5), egy fluidizációs

üvegoszlopot (2) és töltetmagasság mérésére szolgáló mérőszalagot (3). Mielőtt a berendezést üzembe helyeznénk, meghatározzuk a szemcsék főbb jellemzőit (sűrűség, porozitás, fajlagos felület), és megmérjük a töltött oszlop magasságát ( $L$ ). Azután a rotamétert az Y elosztón keresztül a kompresszor csonkjához csatlakoztatjuk, és a fojtószelep segítségével növekvő sorrendbe beállítjuk a térfogat-áramokat. Minden egyes térfogatáram esetén leolvassuk a nyomásvesztést és a töltetmagasságot. A mért és a számított értékeket táblázatban rögzítjük (lásd a 2.5.4. táblázatot).

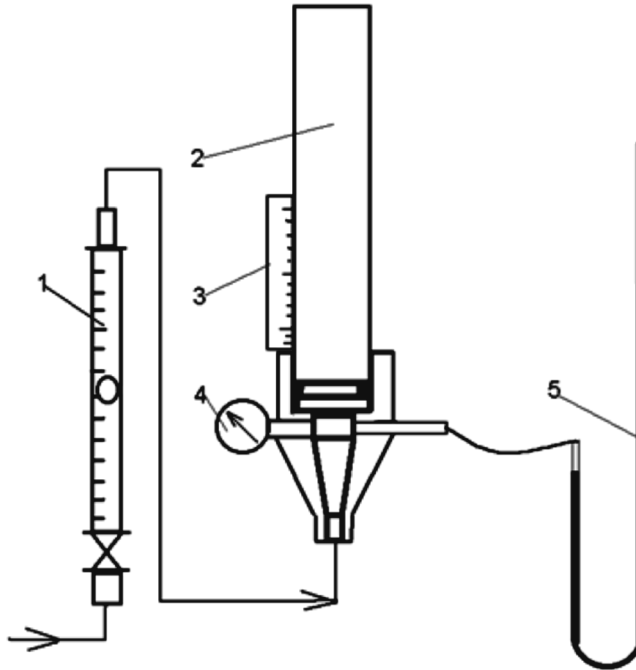
**2.5.4. táblázat.** A fluidizáció tanulmányozásakor mért és számított adatok

$$L_o = \dots$$

S. sz.	$V_{\tau}$ , m <sup>3</sup> /s	$\Delta h$ , mm	$w_g$ , m/s	$L$ , mm	$t$ , °C	$\rho_{FA}$	Nyomásvesztés, Pa		Megjegyzés**
							$\Delta p_{mért}$	$\Delta p_{FA}^*$	

\*A nyomásvesztést csak a fluidizált állapotra számoljuk.

\*\* Megjelöljük a fluidizált állapot beálltát.



**2.5.3. ábra.** A fluidizáció gyakorlati vizsgálatát szolgáló berendezés vázlata:

1 – rotaméter; 2 – üvegcső, 3 – mérőlécz, 4 – manométer; 5 – U-csöves manométer

**A számításához szükséges összefüggések:**

$$- w_g = \frac{4 \cdot V_g}{\pi \cdot d^2} \quad (2.5.18)$$

$$- \rho_{FA} = \rho \cdot \frac{L_0}{L} \quad (2.5.19)$$

$$- \varepsilon_{FA} = 1 - (1 - \varepsilon) \cdot \frac{L_0}{L} \quad (2.5.20)$$

$$- \Delta p_{mért} = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (2.5.21)$$

$$- \Delta p_{FA} = L_{FA} \cdot (1 - \varepsilon_{FA}) \cdot \rho_{FA} \cdot g = L_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \rho \cdot g \quad (2.5.22)$$

ahol:  $V_g$  – a gáz térfogatárama,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $d$  – az üres cső átmérője,  $\text{m}$ ;  $\rho_{FA}$  – a fluidizált töltet sűrűsége,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho$  – a nyugvó töltet sűrűsége,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $L_0$ ,  $L$  – a nyugvó, illetve a fluidizált töltet magassága,  $\text{m}$ ;  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_{FA}$  – a nyugvó, illetve a fluidizált töltet porozitása,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $\Delta p_{mért}$ ,  $\Delta p_{FA}$  – a mért, illetve a számított nyomásvesztés,  $\text{Pa}$ .

A táblázatban rögzített adatok segítségével megszerkesztjük a  $\Delta p \leftrightarrow w$  diagramot, és leolvassuk a kritikus gázáramlási sebességet. Ezt az értéket összehasonlítjuk a (2.5.23) és (2.5.24) összefüggések segítségével számított értékekkel (*Vegyipari műveleti laboratóriumi gyakorlatok*, Veszprém, 2000; Tudose et alii 2001):

$$\text{Rowe összefüggése: } w_k = 8,1 \cdot 10^{-4} \cdot d_p^2 \cdot \frac{\rho_R - \rho_{fl}}{\eta_{fl}} \quad (2.5.23)$$

Hidrodinamikai hasonlóságon alapuló összefüggés:

$$\frac{w_k \cdot d_p \cdot \rho_{fl}}{\eta_{fl}} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \sqrt{Ar}} \quad (2.5.24)$$

ahol:  $\rho_R$  – a részecske sűrűsége,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_{fl}$  – a fluidum sűrűsége,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\eta_{fl}$  – a fluidum dinamikus viszkozitása,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $d_p$  – a részecske szemcsemérete,  $\text{m}$ ;  $Ar$  – az archimédeszi szám:  $Ar = \frac{d_p^3}{\eta_{fl}^2} \cdot (\rho_R - \rho_{fl}) \cdot \rho_{fl} \cdot g$ .

**2.6. Az ülepedési sebesség gyakorlati meghatározása**

Nagyon sok ipari és környezetvédelmi berendezésben a heterogén rendszerek szétválasztására ülepítőket alkalmaznak. Itt a gravitáció hatására a sűrűbb közeg kiválik a szuszpenzióból, és a keletkezett folyadékáram tisztább lesz. A fluidumban áramló részecske és a fluidum között egy ellenállási erő lép fel, amelyet a *közegellenállási törvénnyel* (Fonyó–Fábri 2004) fejezünk ki. Ennek megfelelően az ellenállási erő arányos a normálfelülettel és a kinetikai energiával:

$$F_e = C_D \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (2.6.1)$$

ahol:  $F_e$  – az ellenállási erő,  $\text{N}$ ;  $S$  – a körüláramlott testnek a mozgás irányára merőleges felülete,  $\text{m}^2$ ;  $w$  – az átlagsebesség,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\rho$  – a fluidum sűrűsége,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_D$  – a közegellenállási tényező.

Átrendezve az összefüggést, felírható:

$$\frac{F_c}{S} = \Delta p = C_D \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad \text{vagy} \quad \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2} = Eu = \frac{C_D}{2} \quad (2.6.2)$$

Amint látható, a közegellenállási tényező az *Euler-szám* kétszerese.

Ha a szilárd közeg gömb alakú részecske, akkor a fluidum áramvonalai a Re-szám függvényében különböző formát öltenek. Míg kis Re-szám esetén a szemcséket körüláramló fluidum lamináris, a Re-szám növekedésével a határréteg leválik, és a részecskeáramlás túlsó oldalán örvények keletkeznek. A közegellenállási tényezőt a Re-szám függvényében tudjuk meghatározni (Gavrilă-Zichil 2000; Fonyó-Fábri 2004; Green-Perry 2008) éspedig:

– kis Re-szám esetén ( $Re < 1$ ), azaz a Stokes-tartományban, a közegellenállási tényező értéke:  $C_D = \frac{24}{Re}$  (2.6.3)

– nagyobb Re-szám esetén ( $1 < Re < 800$ ) a közegellenállási tényezőt Allen (2.6.4) vagy Bohnet (2.6.5) képletével számítjuk ki:

$$C_D = \frac{18,5}{Re^{0,6}} \quad (2.6.4)$$

$$C_D = \frac{12}{Re^{0,5}} \quad (2.6.5)$$

– nagyon nagy Re-szám esetén ( $Re > 800$ ) a közegellenállási tényező értéke 0,44.

A gömbtől eltérő alakú testeknél figyelembe kell venni az *alaktényezőt* ( $\phi$ ) is. Így a közegellenállási tényező értékét nemcsak a Re-szám, hanem az alaktényező is befolyásolja. A gömbhöz viszonyított alaktényező nem más, mint az ugyanolyan térfogatú gömb felülete és a test felületének aránya ( $\phi = \frac{A_{gömb}}{A_{test}}$ ).

A 2.6.1. táblázat a különböző testek alaktényező-értékeit tartalmazza.

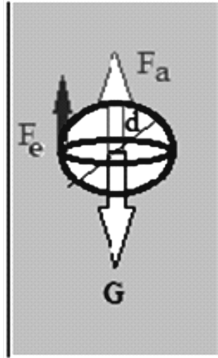
**2.6.1. táblázat.** *Különböző geometriájú szabályos testek gömbhöz viszonyított alaktényezője*

A test megnevezése	$\phi$	A test megnevezése	$\phi$
Henger		Kocka	0,806
H/D=1	0,8738	Négyzet alapú prizma	
H/D=10	0,5792	L/a=0,1	0,4342
H/D=0,1	0,4706	L/a=10	0,5346

Forrás: Gavrilă-Zichil 2000.

Vizsgáljuk meg egy nyugvó folyadékban ülepedő gömb alakú részecske mozgását (lásd a 2.6.1. ábrát). A  $d$  átmérőjű részecskére a tömegerő ( $F_m$ ), vagyis a súlyerő ( $G$ ) és a felhajtóerő ( $F_a$ ) különbsége hat (Gavrilă-Zichil 2000; Fonyó-Fábri 2004):

$$F_m = G - F_a = (\rho_R - \rho_\beta) \cdot V \cdot g = (\rho_R - \rho_\beta) \cdot \frac{\pi d^3}{6} \cdot g \quad (2.6.6)$$



**2.6.1. ábra.** Az ülepedő gömb alakú részecskére ható erők

Ha a részecske mozogni kezd, idővel nő a mozgási sebessége. Ezt a mozgást ellensúlyozza a közegellenállási erő ( $F_e$ ). A két erő – a közegellenállási és a tömegelő – különbsége a lokális impulzusváltozás, mely egy kis idő elteltével (az erők kiegyenlítésének eredményeként) stacionárius állapotba lép, azaz a lokális impulzusváltozás nulla lesz, és a részecske eléri az ülepedési sebességet ( $w_0$ ):

$$F_m - F_e = \frac{d(mw)}{d\tau} = (\rho_R - \rho_\beta) \frac{\pi d^3}{6} g - C_D \frac{\pi d^2}{4} \rho_\beta \frac{w^2}{2} = 0 \quad (2.6.7)$$

$$w_0 = \sqrt{4 \cdot \frac{\rho_R - \rho_\beta}{\rho_\beta} \cdot \frac{d \cdot g}{3 \cdot C_D}} \quad (2.6.8)$$

Figyelembe véve a közegellenállási tényező kifejezéseit lamináris és turbulens közegben, és behelyettesítve azt a (2.6.7.) összefüggésbe, felírható:

– lamináris tartományban:

$$\frac{\pi d^3}{6} \cdot g \cdot (\rho_R - \rho_\beta) = \frac{24}{\text{Re}} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_\beta \cdot w^2}{2} = \frac{12 \cdot \eta}{\rho_\beta \cdot w \cdot d} \cdot \frac{\pi d^2}{2} \cdot \frac{\rho_\beta \cdot w^2}{2} \quad (2.6.9)$$

Innen pedig:

$$w_0 = \frac{\rho_R - \rho_\beta}{18 \cdot \eta} \cdot g \cdot d^2 \quad (2.6.10)$$

– átmeneti tartományban:

$$w_0 = 0,152 \cdot \frac{(\rho_R - \rho_\beta)^{0,714}}{\rho_\beta \cdot 0,44} \cdot g^{0,714} \cdot d^{1,143} \quad (2.6.11)$$

– turbulens tartományban:

$$w_0 = 1,74 \cdot \sqrt{\frac{\rho_R - \rho_\beta}{\rho_\beta} \cdot g \cdot d} \quad (2.6.12)$$

Az ülepedési sebesség kiszámítható a (2.6.13) összefüggéssel definiált Archimédész-szám ( $Ar$ ) ismeretében is, a 2.6.2. táblázatban feltüntetett  $Re$ -szám és  $Ar$ -szám közötti összefüggések segítségével (Pavlov–Romankov–Noszkov 1972):

$$Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho_R - \rho_\beta)}{\eta_\beta^2} \cdot \rho_\beta \cdot g \quad (2.6.13)$$



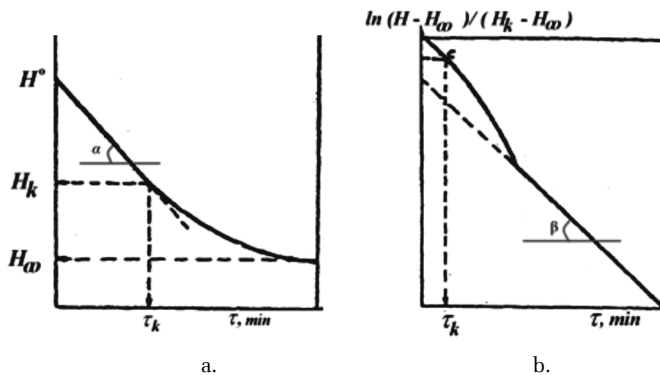
A nagy töménységű szuszpenziók ülepedésekor a részecskék egymás mozgását befolyásolják, így a mért és a számított ülepedési sebesség között különbség lesz. Ezért az ülepitők számításánál a mért ülepedési sebességet használják, főleg ha a szemcsék eltérnek a gömbformától és nagy a szuszpenzió koncentrációja.

**2.6.2. táblázat.** A *Re*-szám és az *Ar*-szám közötti összefüggések különböző áramlási jelleg esetén

Az áramlás jellege	$Re = f(Ar)$	Az <i>Ar</i> -szám intervalluma
Lamináris	$Re = Ar / 18$	$Ar < 36$
Átmeneti	$Re = (Ar / 13,9)^{0,714}$	$36 < Ar < 84000$
Turbulens	$Re = 1,73 \cdot \sqrt{Ar}$	$Ar > 84000$

Forrás: Tudose et alii 2001.

Az *ülepedési görbe* (lásd a 2.6.2.a. ábrát), vagyis a tiszta, szemcse nélküli folyadék és a szuszpenzió határfelület-magasságának időbeli változása lehetővé teszi az *ülepedési sebesség* és az ún. *kritikus idő* (az a pillanat, amikor az összes szilárd részecske a sűrítő zónába került) meghatározását.



**2.6.2. ábra.** Ülepedési görbék:

a) kritikus idő meghatározása (híg szuszpenziók szabad ülepedési görbéje), b) sűrítési idő meghatározása (kritikus koncentrációjú szuszpenzió korlátozott ülepedési görbéje),

$H^0$ ,  $H_k$ ,  $H_\infty$  – kezdeti, kritikus, illetve egyensúlyi hengermagasság/térfogat  
(Tudose et alii 2001)

A szakaszos mérési eredmények nemigen használhatók a folytonos ülepitők tervezésére, hisz ilyenkor nem a kritikus idő szükséges, hanem azon időtartam, ami alatt a szuszpenzió eléri a kívánt töménységet. Ezen érték meghatározására egy újabb mérést szoktak elvégezni, amikor egy olyan szuszpenzió ülepitését tanulmányozzák, amelynek kezdeti töménysége megegyezik az előbbi esetben

mért kritikus töménységgel. A kritikus töménységű szuszpenzió ülepedését követve, vagyis mérve az egyre jobban sűrűsödő szuszpenzió magasságát, megfigyelhető, hogy a sebesség értéke idővel csökken (lásd a 2.6.2.b. ábrát). Erre felírható az alábbi összefüggés:

$$-\frac{dH}{d\tau} = k \cdot (H - H_\infty) \quad (2.6.14)$$

ahol:  $H$  – a  $\tau$  időben mért szuszpenzió magassága,  $m$ ;  $H_\infty$  – a végtelen időben mért szuszpenzió magassága,  $m$ ;  $k$  – állandó.

Integrálva a (2.6.14) egyenletet, a következő összefüggést kapjuk:

$$\int_{H_k}^H \frac{dH}{H - H_\infty} = -k \cdot \int_0^\tau d\tau \rightarrow \ln \frac{H - H_\infty}{H_k - H_\infty} = -k \cdot \tau \quad (2.6.15)$$

Kísérleti adatok segítségével az ülepitési modell állandója lineáris illesztéssel egyszerűen meghatározható (a 2.6.2. ábra lineáris szakaszainak meredeksége, az  $\alpha$ ,  $\beta$  szögek), melynek értékét ismerve kellő pontossággal megbecsülhető azon időtartam, ami alatt az ülepiteni kívánt szuszpenzió eléri a szükséges töménységet, vagy fordítva: adott ülepitési idő mellett meghatározható a kiülepedett szuszpenzió várható töménysége.

### A gyakorlat célja:

Az ülepitési folyamat tanulmányozása, az ülepitési görbék megszerkesztése és az ülepitési sebesség meghatározása mérés és számítás útján.

### A gyakorlati berendezés:

A gátolt ülepedési sebesség gyakorlati meghatározására 2 darab 500 mL-es üveghengert használunk. Az egyik 3% mészkőport tartalmazó vizes szuszpenziót, míg a másik az előbbi kritikus idejének megfelelő töménységű szuszpenziót tartalmaz.

### A mérési feladat és az adatok feldolgozása:

A gátolt ülepedési sebesség meghatározása feltételezi a két szuszpenzió ülepedése mérésének elvégzését. Ezért először a  $C_0 = 3\%$ -os szuszpenzióval kezdjük a mérést:

- A nagyon hosszú ideig álló hengerben leülepedett részecskék létrehozzák a végtelen időnek megfelelő szuszpenziómagasságot (vagyis a  $H_\infty$  értéket). Mielőtt rázással homogénné tennék az I. henger tartalmát, ezt az értéket leolvassuk!

- Azután a hengert többször felfordítjuk, amíg egy homogén szuszpenziót nem kapunk.

- Visszahelyezve a hengert a munkaasztalra leolvassuk és feljegyezzük a kezdeti magasságot ( $H^0$ ), és indítjuk a kronométert.

– Percenként leolvassuk a kitisztult folyadék és a szuszpenziót elhatároló felület magasságát, és lejegyezzük a mérést összesítő 2.6.3. táblázat első két oszlopába. Tíz perc elteltével az olvasást 5 percenként végezzük.

– A 2.6.3. táblázatba gyűjtött adatokkal megrajzoljuk a 2.6.2.a. ábrának megfelelő mérési görbét és meghatározzuk a kritikus magasság ( $H_k$ ) értékét.

– A mérési görbe lineáris szakaszára határozzuk meg annak meredekségét is:  $k_0 = \operatorname{tg} \alpha$  (erre az adatra a későbbiekben lesz majd szükségünk).

**2.6.3. táblázat.** Mért és számított eredmények

1. mérőhenger		2. mérőhenger			
1	2	3	4	5	6
$\tau$ , perc	$H$ , mm	$\tau$ , perc	$H$ , mm	$\frac{H - H_\infty}{H_k - H_\infty}$	$\ln \frac{H - H_\infty}{H_k - H_\infty}$
0		0			
1		1			
15		15			
20		20			

Ezt követően térhetünk rá a kritikus magasságnak megfelelő konzisztenciájú szuszpenzió ülepedési sebességének mérésére a II. hengert használva.

A kritikus magasságnak megfelelő koncentráció ( $C_k$ ) kiszámítása:

– az I. hengerben levő szuszpenziókoncentráció nem más, mint a szilárd anyag tömege ( $m$ ) és a térfogat ( $V$ ) aránya:

$$C_0 = \frac{m}{V} = \frac{m}{H_0 \cdot S} \quad (2.6.16)$$

– hasonlóan, a II. hengerbe töltendő szuszpenzió koncentrációja:

$$C_k = \frac{m}{V_k} = \frac{m}{H_k \cdot S} \quad (2.6.17)$$

A kettő arányából kifejezhető a kritikus magasságnak megfelelő koncentráció:

$$\frac{C_0}{C_k} = \frac{H_k}{H_0} \Rightarrow C_k = C_0 \cdot \frac{H_0}{H_k} \approx C_0 \cdot \frac{V_0}{V_k} \quad (2.6.18)$$

– Kiemeljük a II. hengert a tartóból, és jól összerázzuk.

– Az asztalra helyezett hengerben leolvassuk a kezdeti magasságot ( $H_0^* = H_k$ ), és elindítjuk a kronométert.

– Eleinte percenként, majd miután lelassul a szintkülönbség csökkenése, 5, illetve 10 perces intervallumban olvassuk a szuszpenzió magasságát, és az adatokat a 2.6.3. táblázat harmadik és negyedik oszlopában rögzítjük.

– A meghatározott adatok ismeretében kiszámítjuk a táblázat ötödik és hatodik oszlopának az értékeit.

– A II. mérőhengerben mért adatok ismeretében megszerkesztjük a  $\ln \frac{H - H_\infty}{H_k - H_\infty} \leftrightarrow \tau$  görbét, és meghatározzuk az ülepedési modell  $k$  állandóját ( $\operatorname{tg} \beta = k$ ).

– Ennek segítségével megszabott besűrítési értékre kiszámítható a sűrítési idő a (2.6.15) összefüggést alkalmazva.

– Az ülepedési idő függvényében a várható besűrítési szint is meghatározható. Ehhez a (2.6.15) összefüggést a következő formában írjuk:

$$H - H_\infty = e^{-k \cdot \tau} \cdot (H_k - H_\infty) \Rightarrow H = H_\infty + e^{-k \cdot \tau} \cdot (H_k - H_\infty) \quad (2.6.19)$$

A teljes ülepedési folyamatot tehát két szakaszra oszthatjuk, melynek grafikus ábrázolásához az alábbi modellt alkalmazhatjuk:

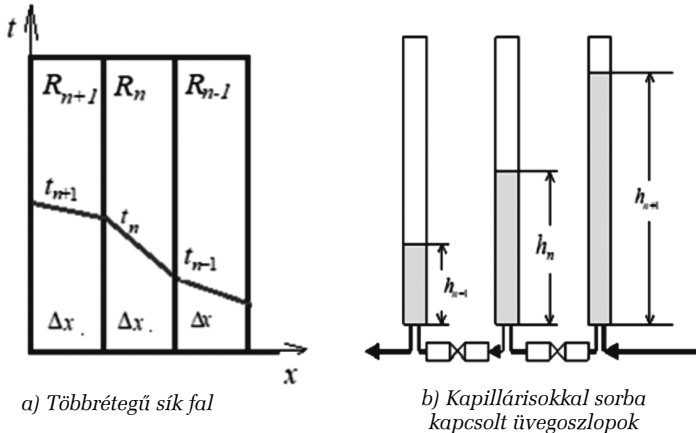
$$H = \begin{cases} H_0 - k_0 \cdot \tau, & 0 \leq \tau < \tau_k \\ H_\infty + (H_0^* - H_\infty) \cdot e^{-k \cdot \tau}, & \tau \geq \tau_k \end{cases} \quad (2.6.20)$$



# HŐTRANSPORTÚ MÉRÉSI GYAKORLATOK

## 2.7. A hővezetés hidrodinamikai modellezése

Különböző közegek fűtéséhez vagy hűtéséhez szükséges idő meghatározása a Fourier-egyenlet megoldásával lehetséges. Mivel ez egy bonyolult művelet, megoldására a hidrodinamikai módszert alkalmazhatjuk. A hidrodinamikai modell alkalmazhatósága annak köszönhető, hogy a fluidumok kapillárisban való áramlása és a hővezetés között matematikai analógiát lehet felfedezni (Tudose et alii 2001). Képzeljünk el egy sík, többrétegű falat, amelyen keresztül hővezetéses hőátvitel történik, és egy kapillárisokkal összekötött csőrendszert, amelyben folyadék áramlik (lásd a 2.7.1. ábrát).



2.7.1. ábra. A hőátadás és a hidrodinamikai áramlás közötti analógia

Az  $n$ -edik rétegen áthaladó hőmennyiség annál nagyobb, minél kisebb a hőellenállás és nagyobb a hőmérséklet-különbség. Ha az átadás iránya az  $n+1$ -től az  $n$  felé tart, akkor felírható:

$$\dot{Q}_{n+1 \rightarrow n} = \frac{t_{n+1} - t_n}{R_{n+1,n}} \quad (2.7.1)$$

Amennyiben a rétegek vastagsága és anyagminősége megegyezik, akkor felírható a következő megközelítő összefüggés:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_i = \dots = R_n = R_{n+1} = \dots \quad (2.7.2)$$

Figyelembe véve a 2.7.1. ábrán feltüntetett analógiát, ahol mindegyik üvegcsőnek megfelel a síkfal egy-egy rétege, írjuk fel a kapillárisokban áramló folyadék térfogatáramát. Fogadjuk el, hogy a kapillárisban a folyadék áramlása lamináris, ebben az esetben a Hagen–Poiseuille-összefüggés alkalmazható. A térfogat-

áram kiszámítható, ha ismert a kapilláris keresztmetszete ( $A$ ), illetve átmérője ( $d$ ) és az áramló közeg sebessége ( $w$ ), vagyis:

$$V_\tau = \frac{dV}{d\tau} = \frac{V}{\tau} = A \cdot w = \frac{\pi d^2}{4} \cdot w \quad (2.7.3)$$

ahol:  $V$  – a mért térfogat,  $m^3$ ;  $\tau$  – a mérési idő, s.

Alkalmazva Darcy–Weisbach összefüggését, és tudva, hogy a lamináris áramlás esetén a kör keresztmetszetre a csősúrlódási tényező értéke  $64/Re$ , felírható:

$$\Delta p = \lambda \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \frac{L}{d} = \frac{64}{Re} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \frac{L}{d} = \frac{64}{\rho \cdot w \cdot d} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \frac{L}{d} \Rightarrow$$

$$w = \frac{\Delta p \cdot d^2}{32 \cdot \eta \cdot L} \quad (2.7.4)$$

$$\text{Következik, hogy a térfogatáram: } V_\tau = \frac{\pi d^4}{128} \cdot \frac{\Delta p}{\eta \cdot L} \quad (2.7.5)$$

$$\text{és a térfogat: } V = \frac{\Delta p}{128 \cdot \eta \cdot L} \cdot \tau_h \quad (2.7.6)$$

ahol:  $\tau_h$  – a mért hidrodinamikai idő (s), ami alatt  $V$  ( $m^3$ ) térfogatú folyadék áramlik át a kapillárison.

Az áramlás hajtóereje a szintkülönbség, amely az üvegcsövek között kialakul. Figyelembe véve, hogy a nyomáskülönbség a gravitációs gyorsulás, a sűrűség és a szintkülönbség szorzata, felírható:

$$V = \frac{\Delta p}{128 \cdot \eta \cdot L} \cdot \tau_h = \frac{\rho \cdot g \cdot \Delta h}{128 \cdot \eta \cdot L} \cdot \tau_h = \frac{\Delta h}{128 \cdot \eta \cdot L} \cdot \tau_h = \frac{\Delta h}{R_h} \cdot \tau_h \quad (2.7.7)$$

ahol:  $R_h = \frac{128 \cdot \eta \cdot L}{\pi d^4 \cdot \rho \cdot g}$  a hidrodinamikai ellenállás,  $s/m^2$ .

Összehasonlítva a (2.7.1) és a (2.7.7) összefüggéseket láthatjuk, hogy a hővezetést és az áramlást analog egyenletek írják le:

$$\dot{Q} = Q_\tau = \frac{t_{n+1} - t_n}{R_t} \Leftrightarrow V_\tau = \frac{h_{n+1} - h_n}{R_h} \quad (2.7.8)$$

Azonos méretű (hosszúság, átmérő) kapillárisok esetén a hidrodinamikai ellenállások megegyeznek:

$$R_{h,n+1 \rightarrow n} = R_{h,n \rightarrow n-1} = R_{h,n-1 \rightarrow n-2} = \dots = R_0 \quad (2.7.9)$$

Írjuk fel az időegység alatt átáramlott hő és folyadékmennyiség közötti összefüggést:

$$Q_\tau \cdot \Delta \tau_t = (Q_{\tau,n+1 \rightarrow n} - Q_{\tau,n \rightarrow n-1}) \cdot \Delta \tau_t = \rho \cdot c_p \cdot V_{fal} \cdot \Delta t_n \quad (2.7.10)$$

$$V_\tau \cdot \Delta \tau_h = (V_{\tau,n+1 \rightarrow n} - V_{\tau,n \rightarrow n-1}) \cdot \Delta \tau_h = A_0 \cdot \Delta h_n \quad (2.7.11)$$

ahol:  $Q_\tau$  – az átadott hőáram, J/s;  $\Delta \tau_t$  – a hőátadási időkülönbség, s;  $V_\tau$  – a térfogatáram,  $m^3/s$ ;  $\Delta \tau_h$  – az áramlási intervallum, hidrodinamikai idő, s;  $A_0$  – az üvegcső keresztmetszetének a felülete,  $m^2$ ;  $\rho \cdot c_p \cdot V_{fal}$  – a réteg hőkapacitása, J/K.

A (2.7.10) és (2.7.11) összefüggéseket felírhatjuk:

$$Q_\tau \cdot \Delta \tau_t = C_i \cdot \Delta t_n \quad (2.7.12)$$

$$V_\tau \cdot \Delta\tau_h = A_0 \cdot \Delta h_n \quad (2.7.13)$$

Tudva, hogy  $Q_\tau = \frac{\Delta t_n}{R_\tau}$  és  $V_\tau = \frac{\Delta h_n}{R_h}$ , felírható:

$$\Delta\tau_t = C_t \cdot R_t \quad (2.7.14)$$

$$\Delta\tau_h = A_0 \cdot R_h \quad (2.7.15)$$

Innen:

$$\frac{\Delta\tau_t}{\Delta\tau_h} = \frac{C_t}{A_0} \cdot \frac{R_t}{R_h} \quad (2.7.16)$$

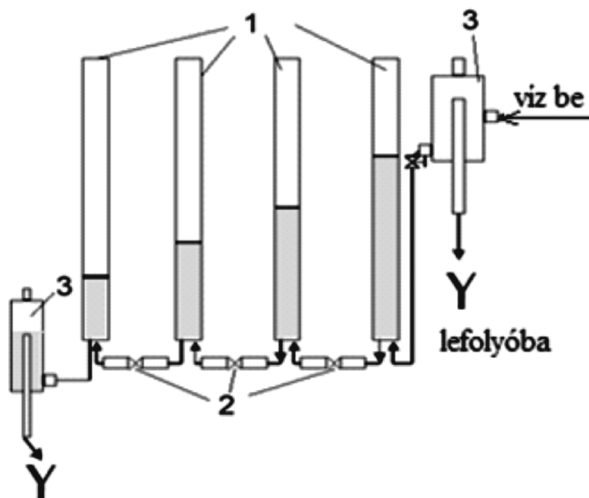
Ismerve a  $C_t$ ,  $R_t$ ,  $R_h$  és  $A_0$  értékeit és lemérve a  $\Delta\tau_h$ -t, ki lehet számítani  $\Delta\tau_t$  értékeit, melyek segítségével meghatározható a hőmérséklet-eloszlás.

### A gyakorlat célja:

- konduktív hővezetés szimulációja sík falon hidrodinamikai modell segítségével,
- hődisztribúció meghatározása hidrodinamikai mérések segítségével.

### A gyakorlati berendezés:

A gyakorlati berendezés egy síklapra szerelt, 4-5 darab 35 x 1,2 mm átmérőjű és 500 mm hosszú, két alsócsonkkal rendelkező és 1 mm átmérőjű kapillárisokkal összekötött üvegcsővet, azoknak megfelelő mérőszalagot és két le-fel mozgatható szin szabályzó edényt tartalmaz (lásd a 2.7.2. ábrát).



2.7.2. ábra. A gyakorlati berendezés vázlata:

1 – üvegcsonnák, 2 – kapilláris, 3 – szintszabályzó tartály



### Mérési feladat:

A vízhálózathoz és a lefolyóhoz csatlakoztatott szintszabályzó tartályokat azonos, minimális szintkülönbségre hozzuk, és vízzel tápláljuk a rendszert, megvárva, amíg az üvegkolonnák között konstans szintkülönbség áll be. Ezután a vízcsaphoz csatlakoztatott szintszabályzót felemeljük a legmagasabb szintre, és megindítjuk a kronométert. (Ez a magasság a hőrendszer legmagasabb hőmérsékletének felel meg, pl. 1473 K-nek.) Egy mérőhengerrel lemérjük a kapillárisokon átfolyt víz térfogatát, és kiszámítjuk a térfogatáramot. Kétpercenként leolvassuk az üvegkolonnákban lévő víz szintjének értékeit, amelyeket a 2.7.1. táblázatban rögzítjük.

2.7.1. táblázat. Mérési adatok

Hidrodinamikai idő, perc	Az üvegcsőekben mért vízszint, cm				Megjegyzés
	1	2	3	4	

A mérési adatok feldolgozásának sorrendje, ha a megoldandó probléma az 1 m<sup>2</sup> felületű 1,2 m vastagságú téglafal hőlefutásának becslése. Ismertek: a fal belső felületének hőmérséklete  $T_f = 1473$  K, a külső tér hőmérséklete  $T = 293$  K, a szerkezeti anyag tulajdonságai (hővezetési tényező értéke  $\lambda = 1$  W/(m·K), sűrűség értéke  $\rho = 1850$  kg/m<sup>3</sup>, fajlagos hőkapacitás  $c_p = 1000$  J/(kg·K) és a megfelelő hidrodinamikai rendszerben (4 darab, 1 mm átmérőjű kapillárisal csatlakoztatott üvegcső) mért szintkülönbségek.

### Megoldás:

1. lépés. Kiszámítjuk a fal hőkapacitását:

$$C_t = \rho \cdot c_p \cdot V_{fal} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\delta_{fal} \cdot F_{fal}}{n} \quad (2.7.17)$$

ahol:  $\delta_{fal}$  – a fal vastagsága, m;  $F_{fal}$  – a fal felülete, m<sup>2</sup>;  $c_p$  – a fal anyagának a fajhője, J/(kg·K);  $\rho$  – a fal anyagának a sűrűsége, kg/m<sup>3</sup>.

2. lépés. Kiszámítjuk egy cső keresztmetszetének a felületét:

$$A_0 = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad (2.7.18)$$

3. lépés: Kiszámítjuk az  $n$ -edik réteg hidraulikus ellenállását:

$$R_h = \frac{\Delta h}{n \cdot V_r} \quad (2.7.19)$$

ahol:  $V_r$  – a kapillárison átfolyt térfogatáram, m<sup>3</sup>/s;  $n$  – az üvegcsővek száma;  $\Delta h$  – a szintszabályzó tartály szintmagassága, m.

4. lépés. Kiszámítjuk a termikus ellenállás értékét:

$$R_t = \frac{\Delta x}{\lambda \cdot F_{fal}} = \frac{\delta_{fal}}{n \cdot \lambda \cdot F_{fal}} \quad (2.7.20)$$

5. lépés. Kiszámítjuk a hidrodinamikusan megfelelő termikus idő értékét:

$$\Delta \tau_t = \Delta \tau_h \cdot \frac{C_t}{A_0} \cdot \frac{R_t}{R_h} \quad (2.7.21)$$

6. lépés. Kiszámítjuk az üvegcsövekben mért szinteknek megfelelő hőmérsékletértékeket három hidrodinamikai időre, és az eredményeket a 2.7.2. táblázatban rögzítjük:

$$T_i = T_{külső} + \frac{T_{belső} - T_{külső}}{\Delta h_{tartály}} \cdot h_i \quad (2.7.22)$$

### 2.7.2. táblázat. Számított értékek

A tartály magassága \_\_\_ m, ami megfelel a \_\_\_ K belső hőmérsékletnek

Hidrodinamikai idő, min	Termikus idő, min	Falréteg hőmérséklete, K			
		1	2	3	4
	$h_i$ , m				
	$T_i$ , K				
	$h_i$ , m				
	$T_i$ , K				

7. lépés. A táblázat adatainak segítségével rajzoljuk meg a  $T_i \leftrightarrow \delta_i$  és  $T_i \leftrightarrow \tau_i$  diagramokat.

## 2.8. A kondenzációs hőátadási tényező gyakorlati meghatározása

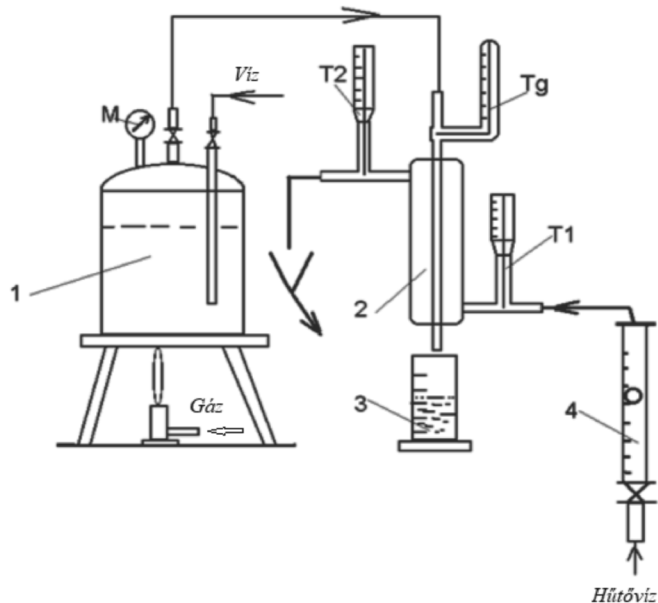
Nagyon sok ipari berendezésben a gőzök kondenzációjakor felszabadult látens hőt alkalmazzuk a fűtésre. Attól függően, hogy a kondenzáció hogyan megy végbe, beszélhetünk felületi (film) vagy térfogati (csepp) kondenzációról. Míg első esetben a hideg felületen vékony réteg keletkezik, a második esetben a cseppfolyós anyag a gáz térfogatában jelenik meg. Ha a részecskék nagyon kicsik, akkor ködképzésről beszélünk. Nagyobb részecskék esetén cseppképződés lép fel. Az ipari berendezésekben a kondenzációs hőátadás a hűtési vagy melegítési folyamatoknál elterjedt. Gőzök kondenzációjával találkozunk a lepárló, desztillációs és egyéb berendezéseknél. Nagyon fontos ipari folyamat a vízgőzzel történő melegítés, ennek során a gőz által tartalmazott kondenzációs energiát használjuk fűtés céljára.

### A gyakorlat célja:

A filmképződéses kondenzáció megvalósítása, az anyag- és energiamérleg elkészítése és a kondenzációs hőátadási tényező meghatározása.

### A gyakorlati berendezés:

A 2.8.1. ábrán feltüntetett gyakorlati berendezés tartalmaz egy vízgőzgenerátort (1) és egy Liebig típusú, cső a csőben hőcserélőt (2), melynek méretei: köpeny 40 x 1 mm, belső cső 11,5 x 1 mm átmérőjű és 340 mm hosszúságú. A hűtőfolyadék térfogatáramát rotaméterrel (4), míg a kondenzátum térfogatáramát köbözéssel határozzuk meg.



**2.8.1. ábra.** A gyakorlati berendezés vázlata:

1 – gőzgenerátor, 2 – hőcserélő, 3 – mérőhenger, 4 – rotaméter,

$T_1$ ,  $T_2$  – a hűtővíz kezdeti, illetve végső hőmérséklete,  $T_g$  – a gőz kezdeti hőmérséklete

### A mérési feladat:

Először is a gőzgenerátort feltöltjük 3/4 részig vízzel és meggyújtjuk a gázégőt. Azután megvizsgáljuk a berendezést, figyelve a kapcsolási sémát, a mérőműszerek jelenlétét és épségét. Mielőtt a rotamétert a hűtővízcsonkhhoz csatlakoztatnánk, meghatározzuk a hűtő belső és külső csövének külső átmérőjét és a falvastagságát (a külső cső falvastagságát egyenlőnek vesszük a belső cső

falvastagságával). Miután a generátor manométere ( $M$ ) mutatja a gőz jelenlétét, megengedjük a hűtővizet és leolvassuk a térfogatáramot. A gőzgenerátor szelepének megnyitásakor megindítjuk a kronométert és kezdjük a mérést.

Leolvassuk a  $T_g$ ,  $T_1$  és  $T_2$  hőmérők jelzését, és ezt megismételjük minden 10 mL kondenzátum gyűjtése után. A kondenzátum hőmérsékletét úgy határozzuk meg, hogy a mérőhengerbe hőmérőt helyezünk. A mérési adatokat a 2.8.1. táblázatban rögzítjük.

**2.8.1. táblázat.** Mérési adatok

S. sz.	$\tau$ , s	$V_{k^*}$ , mL	$V_{\tau_2}$ , L/h	$T_1$ , K	$T_2$ , K	$T_g$ , K	$T_k$ , K	$V_{\tau_1} = V_k \tau$ , m <sup>3</sup> /s

### Számítások és az eredmények kiértékelése:

*A kondenzáció hőmérlege:*

Figyelembe véve a hőcserélőbe belépő anyagáramokat, felírható a következő összefüggés:

$$(V_{\tau_1} \cdot \rho_k) \cdot \Delta H_g + V_{\tau_2} \cdot c_{p2} \cdot T_1 = (V_{\tau_1} \rho_k) \cdot \Delta H_{kond} + V_{\tau_2} \cdot c_{p2} \cdot T_2 + \dot{Q}_V \quad (2.8.1)$$

ahol:  $V_{\tau_1}$  – a gőzfázis térfogatárama, m<sup>3</sup>/s;  $V_{\tau_2}$  – a hűtővíz térfogatárama, m<sup>3</sup>/s;  $\Delta H_g$ ,  $\Delta H_{kond}$  – a gőz, illetve a kondenzátum entalpiája, J/kg;  $c_p$  – a hűtővíz fajhője, J/(kg·K);  $\rho_k$  – a kondenzátum a  $T_k$  hőmérsékleten, kg/m<sup>3</sup>;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_k$  – a közegek hőmérséklete, K;  $\dot{Q}_V$  – a hőveszteség, J/s.

A mérleg segítségével meghatározzuk a hőveszteség értékét. A kondenzációs hőátadási tényezőt a hőátbocsátási együtthatóból számítjuk ki. Először kiszámítjuk a hőátbocsátási tényezőt:

$$K_{mért} = \frac{\dot{Q}}{F \cdot \Delta T_a}, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (2.8.2)$$

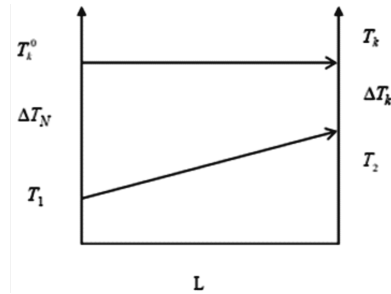
ahol:  $\dot{Q}$  – az átadott hőáram, vagyis:

$$\dot{Q} = \frac{V_k}{\tau_k} \cdot \rho_k \cdot \left[ \Delta H_{kond} + c_{pk} \cdot (T_g - T_k) \right], \text{ J/s;} \quad (2.8.3)$$

$F$  – a hőátadási felület, vagyis:  $F = \pi dL$ , m<sup>2</sup>, (2.8.4)

amelyben:  $d$  – a hőcserélő belső csövének közepes átmérője, m,  $L$  – a hőcserélő belső csövének hossza, m;  $\Delta T_a$  – a logaritmus közepes hőmérséklet-különbség, K, amelyet a hőmérséklet-lefutási diagram segítségével számítunk ki (lásd a 2.8.2. ábrát):

$$\Delta T_a = \frac{\Delta T_N - \Delta T_k}{\ln \frac{\Delta T_N}{\Delta T_k}}, \text{ K} \quad (2.8.5)$$



**2.8.2. ábra.** Hőlefutási diagram

A  $K_{mért}$  meghatározása után kiszámítjuk a hűtővízben fellépő hőátadási tényezőt, az  $\alpha_2$ -t:

1. lépés. Kiszámítjuk a hűtővíz sebességét:

$$w_2 = \frac{V_{r2}}{\frac{\pi}{4} \cdot (D_b^2 - d_k^2)}, \text{ m/s} \quad (2.8.6)$$

ahol:  $D_b, d_k$  – a külső cső belső, a belső cső külső átmérője, m.

2. lépés. Kiszámítjuk a hűtővíz közepes hőmérsékletét:

$$T_{2a} = \frac{T_1 + T_2}{2}, \text{ K} \quad (2.8.7)$$

3. lépés. Meghatározzuk a víz tulajdonságait (sűrűség, viszkozitás és fajhő) a számított közepes hőmérsékleten.

4. lépés. Kiszámítjuk a Re és Pr számokat.

5. lépés. Kiválasztjuk a megfelelő összefüggést a  $Nu$  szám meghatározására és kiszámítjuk azt.

6. lépés. Kiszámítjuk az  $\alpha_2$  értékét.

Ismerve a  $K_{mért}$  és  $\alpha_2$  értékeit, tudva az üveg hővezetési tényezőjét ( $\lambda$ ) és a belső csőfal vastagságát ( $\delta$ ), meghatározzuk az  $\alpha_1$  értékét:

$$\frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{K} - \frac{1}{\alpha_2} - \frac{\delta}{\lambda} \quad (2.8.8)$$

A számított értéket összehasonlítjuk a dimenziómentes összefüggésekkel kapott értékekkel:

$$\alpha_1 = 1,15 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot \Delta H_{kond} \cdot g}{\eta \cdot \Delta T \cdot h}} \quad (2.8.9)$$

ahol:  $\lambda$  – a kondenzátum hővezetési tényezője a  $\frac{T_g + T_k}{2}$  átlagos hőmérsékleten,

$W/m \cdot K$ ;  $\rho$  – a kondenzátum sűrűsége ugyanazon a hőmérsékleten számítva,  $kg/m^3$ ;  $\Delta H_{kond}$  – az átlaghőmérsékleten vett kondenzálási entalpia,  $J/kg$ ;  $g$  – gravitációs gyorsulási állandó,  $m/s^2$ ;  $\eta$  – a kondenzátum viszkozitása az átlagos hőmérsékleten,  $Pa \cdot s$ ;  $\Delta T$  – a kondenzáció és a fal hőmérséklet-különbsége,  $K$ ;  $h$  – a kondenzátumréteg hossza (a folyamat közben mérjük meg a hőcserélőben), m.

# KOMPONENSTRANSZPORTÚ MÉRÉSI GYAKORLATOK

## 2.9. Az anyagátadási együttható gyakorlati meghatározása forgó korong módszerrel

A szilárdanyag oldódásakor a kristályrács szétbomlását a keletkezett hidratált részecskék diffúziója követi. Az elemi folyamatok sebességétől függően – kristályrácsbomlás, illetve hidratált részecskék transzportja – az oldódás transzformációs és diffúziós körülmények között mehet végbe. Ha a szilárd felület közvetlen közelében lévő koncentrációt  $C^f$ -vel és az oldat koncentrációját  $C$ -vel jelöljük, akkor az oldást a (2.9.1), a diffúziót pedig a (2.9.2) összefüggés segítségével tudjuk leírni (Tudose 2000; Fonyó-Fáabri 2004):

$$\frac{dn}{F \cdot d\tau} = k \cdot (C^f)^n \quad (2.9.1)$$

$$\frac{dn}{F \cdot d\tau} = k_r \cdot \Delta C = \frac{D}{\delta} \cdot (C^f - C) \quad (2.9.2)$$

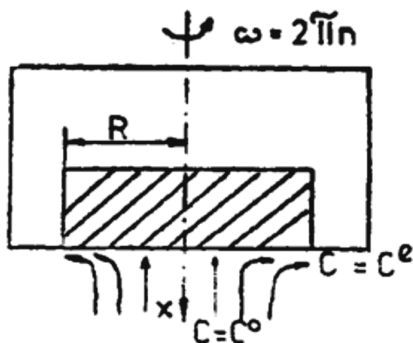
ahol:  $k$  – az oldási folyamat sebességének együtthatója, mértékegysége az  $n$ -től függő;  $k_r$  – az anyagátadási tényező, m/s;  $\delta$  – a szilárd felületet körülvevő folyadék réteg vastagsága, m;  $F$  – az átviteli folyamat felülete, m<sup>2</sup>;  $n$  – az oldott anyag mennyisége, mol;  $\tau$  – a folyamat időtartama, s;  $D$  – diffúziós tényező, m<sup>2</sup>/s,  $\Delta C$  – diffúzió hajtóereje, mol/m<sup>3</sup>.

Az anyagátviteli együttható meghatározására különböző kísérleti technikát alkalmazhatunk (Tudose et alii 2001):

- álló folyadék és álló szilárd anyag;
- álló folyadék, mozgó (ülededő vagy forgó) szilárd anyag;
- álló szilárd anyag és visszavezetett mozgó folyadék;
- kevert üst;
- fluidizációs töltet;
- mosott töltet vagy
- egyrétegű töltet technikát.

Ezek közül az egyik leghozzáférhetőbb a forgó korong technika, amelyben egy álló oldatban  $\omega$  szögsebességgel ( $\omega = 2\pi \cdot n$ ) forgatjuk a korong alakú oldandó anyagot, miközben mérjük az oldat koncentrációjának időbeli változását. A korong forgásának következtében a felületén egy radiális folyadékáramlás lép fel (lásd a 2.9.1. ábrát), mely arra készteti a folyadékot, hogy a korong teljes felületét végigmossa, kioldva onnan az anyagot. Így a korong felületén kialakult  $\delta$  vastagságú rétegben hamarosan beáll az egyensúlyi helyzet, melyet az egyensúlyi koncentrációval ( $C^e$ ) írunk le. Ez a töményebb oldat azonban itt

nem stagnálhat, elhagyja a felületet, helyébe hígabb oldat érkezik, folytatván az oldódási folyamatot.



2.9.1. ábra. A forgó korong fizikai modellje

Stacionárius állapotban ( $\frac{\partial C}{\partial \tau} = 0$ ), figyelembe véve a korong axiális szimetriáját, felírható a konvekciós anyagtranszport egyenlete (Tudose 2000):

$$\left( w_R + \frac{D}{r} \right) \cdot \frac{\partial C}{\partial r} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \quad (2.9.3)$$

ahol:  $w_R$  – az oldat radiális sebessége, m/s;  $D$  – az anyag diffúziós tényezője,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $r$  – a korong egy pontjának a tengelyhez számított távolsága, m.

Mivel a  $D/r$  értéke a radiális sebesség értékéhez képest elhanyagolható, felírható:

$$w_R \cdot \frac{\partial C}{\partial r} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \quad (2.9.4)$$

Megoldva a differenciálegyenletet a peremfeltételek (2.9.5a) függvényében, következik:

$$r > 0 \rightarrow x = 0 \rightarrow C = C^e \quad (2.9.5a)$$

$$r = 0 \rightarrow x > 0 \rightarrow C = 0$$

$$C = C^e \cdot \left( 1 - \frac{x}{\sqrt{\pi \cdot \frac{D \cdot r}{w_R}}} \right) \quad (2.9.5)$$

A sebesség radiális összetevőjének összefüggése:

$$w_R = 0,51 \cdot \omega^{3/2} \cdot \nu^{-1/2} \cdot r \cdot x \quad (2.9.6)$$

Kiszámítva a  $\delta$  rétegre és a teljes sugárra az átlagsebességet:

$$\bar{w}_R = 0,51 \cdot \omega^{3/2} \cdot \nu^{-1/2} \cdot R \cdot \delta \quad (2.9.7)$$

Ismerve az átadatott célkomponens áramot:

$$n_A = \frac{D}{\delta} \cdot (C^e - C) \quad \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}), \quad (2.9.8)$$

$$\text{felírható: } \delta = \frac{D}{n_A} \cdot (C^e - C), \text{ m.} \quad (2.9.9)$$

A pillanatnyi átvitt célkomponens összefüggésből:

$$n_A = -D \cdot \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (2.9.10)$$

kifejezve a koncentrációgradienst ( $dC/dx$ ) a (2.9.5) összefüggésből, majd behelyettesítve annak értékét a (2.9.10) egyenletbe, következnek:

$$n_A = \sqrt{\frac{D \cdot w_r}{\pi \cdot r}} \cdot C^e \quad (2.9.11)$$

Az átlagos célkomponens áram értéke pedig:

$$\bar{n}_A = \sqrt{\frac{0,51}{\pi}} \cdot D^{1/2} \cdot \omega^{3/4} \cdot \nu^{-1/4} \cdot \delta^{1/2} \cdot C^e \quad (2.9.12)$$

Behelyettesítve a (2.9.9) összefüggésbe, és elhanyagolva a  $C$  értékét a  $C^e$ -hez képest, következnek:

$$\delta = 1,83 \cdot \omega^{-1/2} \cdot D^{1/3} \cdot \nu^{1/6} \quad (2.9.13)$$

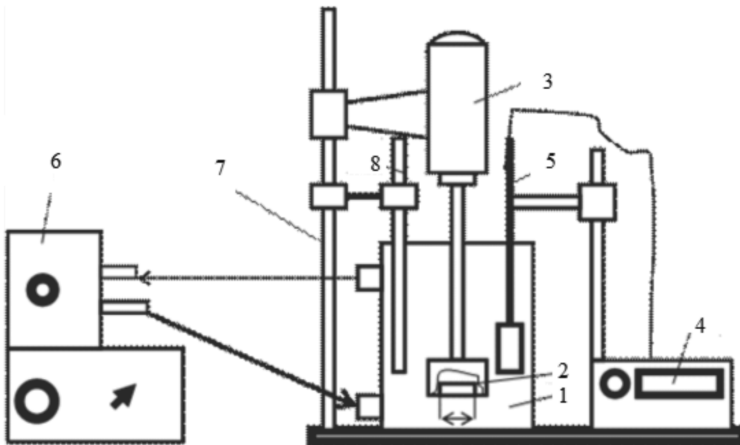
Tudva, hogy  $\beta_l = \frac{D}{\delta}$ , következnek:

$$\beta_l = 0,5489 \cdot \omega^{1/2} \cdot D^{2/3} \cdot \nu^{-1/6} \quad (2.9.14)$$

Tehát az anyagátadási együttható arányos a diffúziós állandó  $2/3$  hatványával, a szögsebesség négyzetgyökével, és fordítottan arányos a kinematikai viszkozitás  $1/6$  hatványával.

### A gyakorlat célja:

Az anyagátadási együttható gyakorlati meghatározása a mérésekre alapozott összefüggések és a (2.9.14) összefüggés alapján.



**2.9.2. ábra.** A kísérleti berendezés vázlatja:

- 1 – fűtőköpenyes üst, 2 – korong, 3 – keverő, 4 – konduktométer,  
5 – mérőcella, 6 – termosztát, 7 – állvány, 8 – hőmérő





### Az eredmények feldolgozása, számítások:

A mérési eredményeket felhasználva kiszámítjuk az anyagátviteli tényezőt. A számításokhoz szükséges tulajdonságokat a mellékletekben feltüntetett adatok segítségével határozzuk meg.

*Első lépésben* a végső koncentrációt határozzuk meg: a 2.9.1. táblázat segítségével megrajzolt  $C \leftrightarrow \tau$  görbéből vagy a korong két méréséből, a kezdeti ( $m_0$ ) és a végső ( $m$ ) értékek felhasználásával számítjuk ki:

$$C = \frac{m_0 - m}{V}, \text{ g/L} \quad (2.9.17)$$

A *második lépésben* a melléklet felhasználásával meghatározzuk a  $C$  értéknek megfelelő dinamikai viszkozitást ( $\eta$ ) és sűrűséget ( $\rho$ ). Ezek segítségével kiszámítjuk a kinematikai viszkozitást ( $\nu = \eta/\rho$ ).

A *harmadik lépésben* kiszámoljuk a szögsebességet ( $\omega = 2\pi \cdot n$ ) és az első lépésben meghatározott koncentrációnak megfelelő diffúziós állandó értékét (lásd a 2.9.2. táblázatot).

A *negyedik lépésben* az anyagátadási tényező értékét számítjuk ki a (2.9.14) összefüggés segítségével. Az adatokat a 2.9.3. táblázatban rögzítjük.

**2.9.2. táblázat.** A NaCl diffúziós állandó értékei különböző koncentrációjú oldatban, különböző hőmérsékleten

Hőmérséklet, K	A diffúziós állandó értéke, $D \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$				
	Híg oldat	2%	4%	6%	8%
293	0,127	0,120	0,120	0,123	0,128
298	0,161	0,147	0,147	0,148	0,151
313	0,236	0,197	0,197	0,198	0,201
333	0,337	0,260	0,267	0,263	0,267

Forrás: Harja et alii 2013.

**2.9.3. táblázat.** Számított értékek összefoglalása

T, K	$\tau$ , s	C, g/L	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$\eta$ , Pa·s	$\nu$ , m <sup>2</sup> /s	D, m <sup>2</sup> /s	$\omega$ , rad/s	$\beta_l$ , m <sup>2</sup> /s (2.9.14)

A számított értékeket összehasonlítjuk a mérésekből kapott értékekkel, vagyis:

$$\beta_l = \frac{\Delta m}{C^e} = \frac{F \cdot \Delta \tau}{C^e} \quad (2.9.18)$$

$$\text{vagy } \beta_l = \frac{dC}{C^e - C} \cdot \frac{V^0}{F} \quad (2.9.19)$$

$$\beta_l = \frac{V^0 \cdot C}{F \cdot \tau} \cdot \frac{1}{C^e} \quad (2.9.20)$$

ahol:  $V^0$  – a kísérletekben használt víz térfogata,  $\text{m}^3$ ;  $F$  – a korong-víz érintkezési felülete,  $\text{m}^2$ ;  $C^e$  – a mérési körülményeknek megfelelő só oldékonysága,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\tau$  – a végső idő, s;  $C$  – az oldat végső koncentrációja,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\Delta m = (m^0 - m)$  – a korong tömegének a változása, kg;  $dC/d\tau$  – az oldat koncentrációjának időbeli változása, azaz a 2.9.1. táblázat adataiból megrajzolt  $C \leftrightarrow \tau$  görbe deriváltja (érintő meredeksége) a  $\tau$  időpontban,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ .

Az anyagátadási tényezőt kiszámíthatjuk a (2.9.21) összefüggés grafikus ábrázolásával is:

$$\beta_l = \frac{V^0}{F \cdot \tau} \cdot \ln \frac{C^e}{C^e - C} \quad (2.9.21)$$

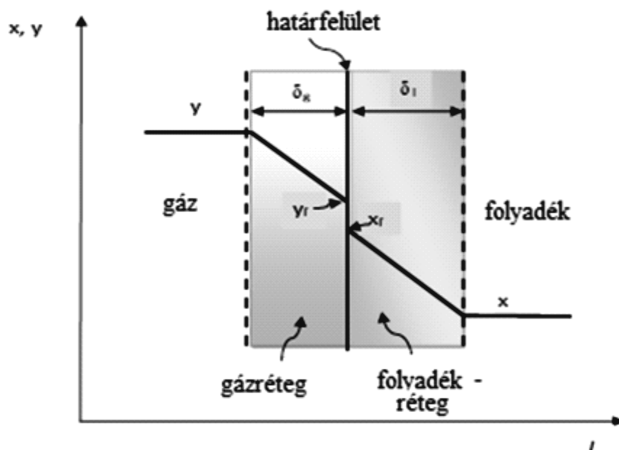
A mérési adatok segítségével megszerkesztjük a 2.9.4. táblázatot, majd Excel grafika alkalmazásával megrajzoljuk a  $\ln \frac{C^e}{C^e - C} \leftrightarrow \tau$  egyenest, melynek meredekségéből kiszámoljuk a  $\beta_l$  értékét.

**2.9.4. táblázat.** Az  $n = \dots\dots$  fordulatszámon megvalósított kísérlet adatai ( $F = \dots\dots\dots \text{m}^2$ ,  $V^0 = \dots\dots \text{m}^3$ ).

$\tau$ , s								
$C$ , g/L								
$C^e - C$								
$\ln \frac{C^e}{C^e - C}$								

## 2.10. A komponensátadási tényező meghatározása lecsurgó filmes kolonnában

Ha a gázt és a folyadékot közvetlenül érintkeztetjük, akkor a két fázis között fellép egy nagyon nehezen meghatározható fázishatár. Az egyes fázisokban fellép egy koncentrációgradiens, melyet legjobban a két filmmmodell ír le (lásd a 2.10.1. ábrát). Legyen egy gázfázisú célkomponens, melyet a gázfázisból akarunk kiválasztani a folyadékfázis segítségével. Ahhoz, hogy a komponens átjusson a gázfázisból a folyadékfázisba, át kell lépnie a két fázis közti határt. A határ közelében, mind a gázfázisban, mind a folyadékfázisban fellép egy-egy koncentrációkülönbség ( $y - y_j$ ), illetve ( $x_j - x$ ), amely a célkomponens transzport hajtóereje (Fonyó–Fábrí 2004; Bratu 1984c).



**2.10.1. ábra.** A komponens koncentrációjelképe:

$x$  – folyadékfázisban,  $y$  – gázfázisban

A határfelületen ( $h_f$ ) kialakult koncentrációt nagyon nehéz meghatározni, épp ezért ezt általában az egyensúlyi koncentrációra vezetjük vissza. Ha figyelembe vesszük a célkomponens két fázis közötti eloszlását, akkor megrajzolhatjuk az  $y \leftrightarrow x$  egyensúlyi görbét (lásd a 2.10.2. ábrát). A P pont a két fázisban mért főtérmeg-koncentrációt, míg az M pont a fázishatáron lévő koncentrációt jelképezi (Bratu 1984c; Fonyó–Fábrri 2004; Mămăligă–Petrescu 2004; Green–Perry 2008).

Írjuk fel az **A** komponens áramsűrűségét mindkét fázis esetében:

$$j_{A,g} = \frac{N_{A,g}}{F} = \beta_g \cdot (y_A - y_A^{hf}) \quad (2.10.1)$$

$$j_{A,l} = \frac{N_{A,l}}{F} = \beta_l \cdot (x_A^{hf} - x_A) \quad (2.10.2)$$

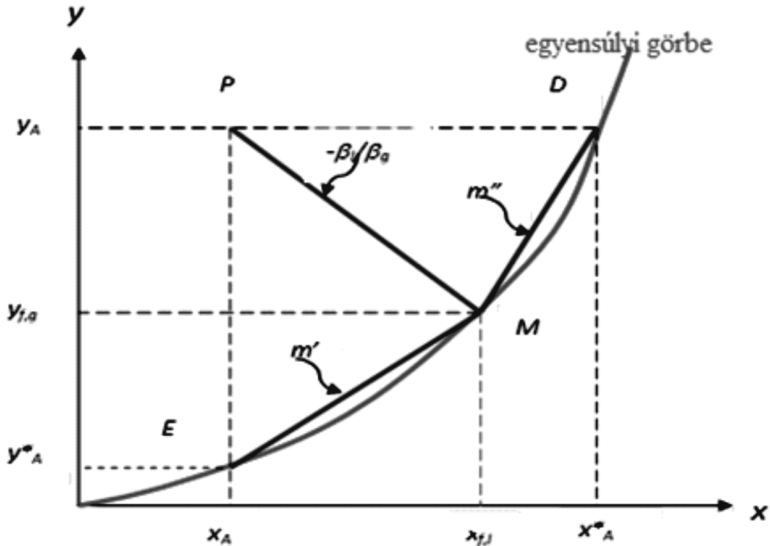
ahol:  $N_{A,g}$ ,  $N_{A,l}$  – a gázban, illetve a folyadékban fellépő komponensáram, mol/s;  $\beta_g$ ,  $\beta_l$  – a gázban, illetve a folyadékban fellépő komponensátadási tényező, m/s;  $y_A$ ,  $x_A$  – az A komponens móltörtje a gázban, illetve a folyadékban,  $h_f$  – határfelület.

A stacionárius állapot beálltakor a két áramsűrűség egyenlő, tehát felírható:

$$j_{A,g} = j_{A,l} \Rightarrow \beta_g \cdot (y_A - y_A^{hf}) = \beta_l \cdot (x_A^{hf} - x_A) \quad (2.10.3)$$

Innen:

$$\frac{y_A - y_A^{hf}}{x_A - x_A^{hf}} = - \frac{\beta_l}{\beta_g} \quad (2.10.4)$$



2.10.2. ábra. A hajtóerők alakulása az A komponens abszorpciójánál

A (2.10.4) összefüggésben a hajtóerők hányadosa nem más, mint a PM egyenes meredeksége (lásd a 2.10.2. ábrát). Tehát ha a két komponensátadási tényező ismert ( $\beta_g, \beta_l$ ), akkor a fázishatár-koncentrációk a PM vonal  $-\beta_l / \beta_g$  meredekséggel való megszerkesztésével meghatározhatók, vagyis a P pontból húzunk egy egyenest, amely az M pontban metszi az egyensúlyi görbét, megadva a fázishatár-koncentrációt. Mivel ez nehezen meghatározható, a megoldás az áramsűrűségek átírása:

$$j_{A,g} = K_G \cdot (y_A - y_A^*) \quad (2.10.5)$$

$$j_{A,l} = K_L \cdot (x_A^* - x_A) \quad (2.10.6)$$

ahol: a  $K_G, K_L$  – a gáz-, illetve a folyadékfázishoz tartozó teljes hajtóerőkre vonatkozó anyagátbocsátási tényezők,  $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $y_A^*$  – az  $x_A$  folyadékfázisú koncentrációnak megfelelő egyensúlyi koncentráció,  $\text{kmol}/\text{kmol}$ ;  $x_A^*$  – az  $y_A$  gázfázisú koncentrációnak megfelelő egyensúlyi koncentráció,  $\text{kmol}/\text{kmol}$ .

Az  $y_A - y_A^*$  teljes gradiens felírható:

$$y_A - y_A^* = (y_A - y_A^{hf}) - (y_A^{hf} - y_A^*) \quad (2.10.7)$$

Bevezetve az E és M pontok közötti meredekséértéket ( $m'$ ) (Fonyó-Fábrí 2004), felírható:

$$m' = \frac{y_A^{hf} - y_A^*}{x_A^{hf} - x_A} \quad (2.10.8)$$

Behelyettesítve a (2.10.7) összefüggésbe, következik:

$$y_A - y_A^* = (y_A - y_A^{hf}) - m' \cdot (x_A^{hf} - x_A) \quad (2.10.9)$$

Ha a gradienseket kifejezzük a megfelelő összefüggésekből, és behelyettesítjük a (2.10.9) összefüggésbe, következik:

$$\left. \begin{aligned} y_A - y_A^* &= \frac{1}{K_G} \\ y_A - y_A^{hf} &= \frac{1}{\beta_g} \\ x_A^{hf} - x_A &= \frac{1}{\beta_l} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{1}{K_G} = \frac{1}{\beta_g} + m' \cdot \frac{1}{\beta_l} \quad (2.10.10)$$

Tehát az anyagátadási teljes ellenállás ( $1/K_G$ ) egyenlő a gázoldali film ellenállásának ( $1/\beta_g$ ) és a folyadékoldali film ellenállásának ( $m'/\beta_l$ ) összegével (Fonyó-Fábrí 2004).

Hasonló módon meghatározhatjuk a folyadékoldalról is az ellenállásokat. Felírjuk először is a teljes hajtóerő kifejezését:

$$x_A^* - x_A = (x_A^* - x_A^{hf}) - (x_A^{hf} - x_A) \quad (2.10.11)$$

Bevezetve az MD meredekségét ( $m''$ ), következik:

$$m'' = \frac{y_A - y_A^{hf}}{x_A^* - x_A^{hf}} \quad (2.10.12)$$

Innen:

$$x_A^* - x_A^{hf} = \frac{1}{m''} \cdot (y_A - y_A^{hf}) \quad (2.10.13)$$

vagyis:

$$x_A^* - x_A = \frac{1}{m''} \cdot (y_A - y_A^{hf}) - (x_A^{hf} - x_A) \quad (2.10.14)$$

Kifejezve a gradiensek értékét, és behelyettesítve a (2.10.14) összefüggésbe, következik:

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{m'' \cdot \beta_g} + \frac{1}{\beta_l} \quad (2.10.15)$$

Ha az  $m'$  nagyon kicsi, az egyensúlyi görbe majdnem vízszintes, akkor az  $m'/\beta_l$  kicsi és az  $A$  komponens nagyon jól oldódik a folyadékban. Ilyen esetben felírható:

$$\frac{1}{K_G} \approx \frac{1}{\beta_g} \quad (2.10.16)$$

ami azt jelenti, hogy egyedül a gázfázis szabályozza az anyagátbocsátást.

Ha az  $m''$  nagyon nagy, akkor az  $A$  nagyon rosszul oldódik a folyadékban, és ekkor:

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{\beta_l} \quad (2.10.17)$$

Ilyenkor a folyadékfázis szabályozza az anyagátbocsátást. Ez az eset például a szén-dioxid vízben történő oldódása.

Ahhoz, hogy a folyadék felőli komponensátadási tényezőt, azaz a  $\beta_l$  értékét meghatározzuk, egy olyan rendszert kell kiválasztanunk, amelyben az  $A$  komponens a folyadékban nehezen oldódik, és a gáz felőli filmben fellépő koncentrációs elhanyagolható (nem áll fenn a gáz felőli részben a diffúziót gátló ellenállás). Természetesen a  $\beta_l$  meghatározása feltételezi a  $K_L$  meghatározását, amely a

(2.10.6) összefüggés szerint megköveteli az átvitt anyagmennyiség, a felület és a hajtóerő ismeretét, vagyis:

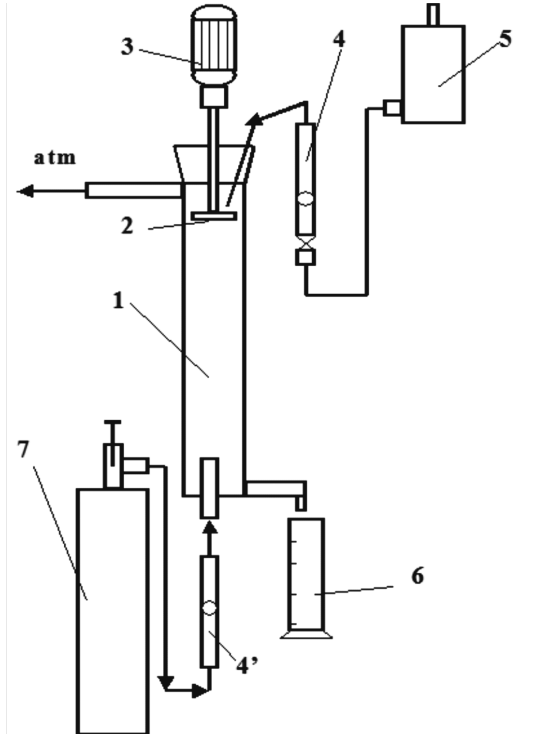
$$K_L = \frac{j_A}{x_A^* - x_A} = \frac{N_A/F}{x_A^* - x_A}, \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad (2.10.18)$$

### A gyakorlat célja:

A komponensátadási tényező meghatározása a folyadékfázishoz tartozó teljes hajtóerő segítségével.

### A gyakorlati berendezés:

A 2.10.3. ábrán bemutatott berendezés tartalmaz egy lecsurgó filmes kolonnát (1), amelyet szén-dioxiddal és desztillált vízzel táplálunk. A lecsurgó film előállítására a forgó korong módszert alkalmazzuk (2, 3).



**2.10.3. ábra.** A gyakorlati berendezés vázlatja:

- 1 – lecsurgó filmes kolonna (kb. 50 x 1,5 mm), 2 – forgó korong,
- 3 – elektromos motor, 4 – víz-rotaméter, 4' – gáz-rotaméter,
- 5 – desztilláltvíz-tartály, 6 – mérőhenger, 7 – szén-dioxid-palack

A bevezető csonkon adagolt ismert térfogatámú (4) vizet a szabályozható fordulatszámú korong segítségével (2) az üvegkolonna falára pörgetjük. A berendezés tartalmaz még gázpalackot (7), a gázáram meghatározására szolgáló rotamétert (4'), a folyadékáram meghatározására szolgáló mérőhengert (6) és víztartályt (5). A berendezést a mintafeldolgozó laboratóriumi egység is kiszolgálja.

### A mérési feladat:

A mérés megkezdése előtt meghatározzuk a kolonna átmérőjét és falvastagságát, majd beindítjuk a koronghajtó motort (3), és adagolni kezdjük a desztillált vizet. Miután a kolonna belső falán egy folytonos filmet kaptunk, lemérjük a film hosszát ( $L$ ), a rotaméter vagy a köbözési módszer segítségével meghatározzuk a víz térfogatámát, és a kilépő csonkon gyűjtött mintában meghatározzuk a folyadék hőmérsékletét.

Ezek után megnyitjuk a palack (7) csapját, gázt adagolva a kolonnába. Kb. 5 perc elteltével elkezdjük az első mintavevést, melyet kétpercenként megismétlünk (4-5 minta).

A mintavevés nem más, mint hogy a kolonna alsó csonkján kiveszünk 60 mL oldatot ( $V_p$ ), melyhez 40 mL 0,1 N NaOH-oldatot ( $V_{NaOH}$ ) adagolunk, majd az így kapott oldatot fenolftalein indikátor jelenlétében visszatitráljuk 0,1 N sósav-oldattal ( $V_{HCl}$ ).

A mért térfogatok segítségével kiszámítjuk az oldat szén-dioxid-tartalmát:

$$x_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_l} = \frac{\frac{V_{NaOH} - n' \cdot V_{HCl}}{E_{NaOH}} \cdot M_{CO_2} \cdot T_{NaOH}}{\frac{V_p}{M_{H_2O}} \cdot \rho_{H_2O}} \quad (2.10.19)$$

ahol:  $n_{CO_2}$ ,  $n_l$  – a szén-dioxid, illetve a víz anyagmennyisége, mol;  $n'$  – 1 mL sósavoldat titrálásához szükséges NaOH-oldat, mL NaOH/mL HCl;  $T_{NaOH}$  – a nátrium-hidroxid-oldat koncentrációja, g/mL;  $V_p$  – a bemért minta térfogata, mL;  $E_{NaOH}$  – a nátrium-hidroxid egyenértékű tömege, g/eqv;  $M_{CO_2}$  – a szén-dioxid móltömege, g/mol;  $M_{H_2O}$  – a víz móltömege, g/mol;  $\rho_{H_2O}$  – a víz sűrűsége, g/cm<sup>3</sup>.

### Számítások és az eredmények kiértékelése:

– Meghatározzuk az átviteli felület ( $F$ ) nagyságát:

$$F = \pi \cdot D_b \cdot L, \text{ m}^2 \quad (2.10.20)$$

ahol:  $D_b$  – a kísérlet megkezdése előtt megmért kolonna belső átmérője, m;  $L$  – a nedvesített hosszúság, m.

– Meghatározzuk az 1 atm nyomásnak megfelelő egyensúlyi szén-dioxid-tartalmat:



$$x_{CO_2}^* = \frac{1}{k_H}, \text{ mol/mol H}_2\text{O} \quad (2.10.21)$$

ahol: a  $k_H$  – a Henry-állandó értékét a 2.10.1. táblázatból olvassuk ki.

**2.10.1. táblázat.** A Henry-állandó változása a hőmérséklet függvényében

<b>T, K</b>	273	283	293	303	313
<b><math>k_H</math>, atm</b>	728	1040	1420	1860	2330

Forrás: Nenişescu 1952.

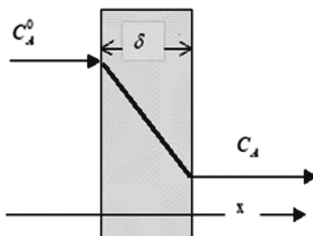
– Kiszámítjuk az átadott szén-dioxid-áramot és a komponensátadási tényezőt:

$$N_{CO_2} = N_l \cdot (x_{CO_2} - x_{CO_2}^0) = N_l \cdot x_{CO_2}, \text{ mol/s} \quad (2.10.22)$$

$$\beta_l \approx K_L \approx \frac{N_{CO_2}}{x_{CO_2}^* - x_{CO_2}} \quad (2.10.23)$$

## 2.11. Az effektív diffúziós tényező gyakorlati meghatározása

A szilárd, porózus közegek anyagtranszportja függ a pórusok és természetesen a diffúzióban részt vevő részecskék méretétől. Míg a nagy átmérőjű pórusokban többnyire elenyésző a fallal való ütközés aránya és a molekuláris diffúzió van túlsúlyban, a kis pórusméretű anyagok esetén az ún. Knudsen típusú diffúzió a mérvadó. Amikor a pórusok mérete mind a mikro-, mind a makrozónát átöleli, mindkét mechanizmus érvényesül, és így az anyagátadásban egy **effektív diffúziós tényezővel** számolhatunk (Bratu 1984c; Fonyó–Fábrı 2004).



**2.11.1. ábra.** A diffúzió ábrázolása

Abban az esetben, amikor a pórusméretet nem ismerjük, a diffúziós tényező meghatározására mérést alkalmazunk. A mérést úgy kell elvégezni, hogy a porózus anyag két oldalán lévő fluidumban a komponenstranszport sebessége jóval nagyobb legyen, vagyis a főtömegben az ellenállás elhanyagolható legyen. Erre szolgál a turbulens áramlás, amikor az oldatban a konvekciós transzport többszöröse a molekuláris diffúziónak.

Legyen egy  $\delta$  vastagságú és  $F$  felületű porózus anyagunk, amelyben a 2.11.1. ábrának megfelelő koncentrációesés lép fel.

Az effektív diffúziós tényezőt ( $D_{ef}$ ) bevezetve, írjuk fel az átadott komponensáram sűrűségét (Tudose 2000):

$$j_A = -D_{ef} \cdot \frac{dC_A}{dx} \quad (2.11.1)$$

A következő határfeltételeket alkalmazva, oldjuk meg az egyenletet:

$$x = 0, C_A = C_A^0$$

$$x = \delta, C_A = C_A$$

$$j_A \cdot \int_0^\delta dx = -D_{ef} \cdot \int_{C_A^0}^{C_A} dC_A \Rightarrow j_A = \frac{D_{ef}}{\delta} \cdot (C_A^0 - C_A) \quad (2.11.2)$$

Innen, ha a  $D_{ef}$  állandó, akkor felírható:

$$D_{ef} = \frac{j_A}{C_A^0 - C_A} \cdot \delta = \frac{V \cdot \Delta C_A}{F} \cdot \frac{\delta}{C_A^0 - C_A} \quad (2.11.3)$$

Tehát az effektív diffúziós tényező meghatározásához szükséges ismerni az anyag vastagságát ( $\delta$ ), a felületét ( $F$ ), és meg kell határozni stacionárius körülmények között a transzportált komponensáramot ( $j_A = \frac{V \cdot C_A}{F}$ ).

### A gyakorlat célja:

- A gyakorlati berendezés megismerése és annak stacionárius állapotba hozása.
- Az effektív diffúzió meghatározása folyadék-folyadék rendszer esetén.

### A gyakorlati berendezés:

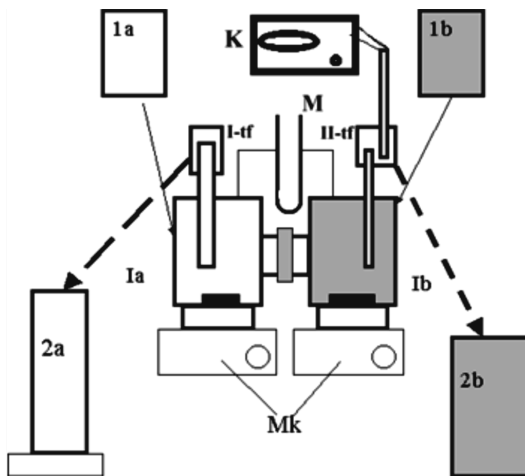
A 2.11.2. ábrán bemutatott berendezés két fél cellából áll (Ia, Ib), amelyek egymással a porózus membránon keresztül kommunikálnak. A fél cellákhoz egy U-csöves manométer (M) és két db túlfolyó (I-tf, II-tf) van hozzacsatolva. A berendezéshez tartozik még két oldatot tartalmazó tartály (1a, 1b) és egy-egy gyűjtőtartály (2a, 2b). A fél cellák egy-egy mágneses keverővel (Mk) vannak ellátva. A permeátum koncentrációjának a mérésére egy kalibrált konduktométert alkalmazunk (K).

### A mérési feladat:

- Mielőtt a mérést megkezdzenénk, meghatározzuk a porózus anyag vastagságát ( $\delta$ ) és felületét ( $F$ ), majd a tömítők segítségével a két fél cella közé helyezzük.
- Feltöltjük a két tartályt: az 1a jelzésű edénybe sósavoldatot (0,1 N), az 1b jelzésűbe pedig desztillált vizet töltünk.
- Megnyitjuk a csapokat, és feltöltjük a fél cellákat.

– Mikor a túlfolyókon megjelenik a folyadék, beindítjuk a keverést, és beállítjuk a két áramot úgy, hogy a manométer két ága ugyanolyan szintet mutasson. Közben követjük a konduktométer kijelzőjét.

– Amikor a leolvasott érték állandó, bemérjük az átdiffundált sósav mennyiségét. Ezért a II-tf csatlakozóját kiemeljük a 2b tartályból és egy 25 mL-es mérőlombikba helyezük, és megindítjuk a kronométert. Miután összegyűjtöttük a 25 mL oldatot, megállítjuk a kronométert ( $\tau$ ), és a lefolyót visszahelyezzük a 2b tartályba. Egy perc múlva újabb mérést végzünk a fentieknek megfelelően, majd ezt még egyszer megismételjük (azaz összesen 3 mintát veszünk).



**2.11.2. ábra.** A gyakorlati berendezés vázlatja:

*1a, 1b – fél cellák, Mk – mágneses keverők, 2a, 2b – gyűjtőedények,  
I-tf, II-tf – túlfolyók, 1a, 1b – sósavoldat, illetve vízestartály,  
M – manométer, K – konduktométer*

– A mérőlombik tartalmát 250 mL-es Berzelius-pohárba töltjük, majd a mérőlombikot kétszer kimossuk 20-20 mL vízzel, a mosóvizet az oldathoz adagoljuk. Az így kapott oldatot NaOH-oldattal titráljuk, meghatározva a lúgfogyasztást ( $V_{\text{NaOH}}$ ).

– Minden egyes titrálás után kiszámítjuk az átdiffundált sósav mennyiségét ( $n_{\text{HCl}}$ ) a (2.11.4) és (2.11.5) összefüggéseket alkalmazva, majd a sósaváramot és az áramsűrűséget ( $\bar{n}_{\text{HCl}}$ ) a (2.11.6) összefüggéssel:

$$C_{\text{HCl}} = \frac{T_{\text{NaOH}} \cdot V_{\text{NaOH}}}{E_{\text{NaOH}}} \cdot \frac{1000}{25}, \frac{\text{mol}}{\text{L}} \quad (2.11.4)$$

$$n_{\text{HCl}} = V_{\beta} \cdot C_{\text{HCl}}, \text{ mol} \quad (2.11.5)$$

$$\bar{n}_{\text{HCl}} = \frac{n_{\text{HCl}}}{F \cdot \tau} = \frac{V \cdot C_{\text{HCl}}}{F \cdot \tau}, \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad (2.11.6)$$

ahol:  $T_{\text{NaOH}}$  – a titráláshoz használt nátrium-hidroxid-oldat koncentrációja, g/mL;  
 $E_{\text{NaOH}}$  – a nátrium-hidroxid egyenértéktömege, g/eqv;  $V_{\text{NaOH}}$  – a fogyott oldat tér-

fogata, mL;  $V_{\beta}$  – a minta végtérfogata, mL,  $F$  – a membrán felülete, m<sup>2</sup>,  $C_{HCl}$  – az átdifundált hidrogén-klorid koncentrációja, mol/L,  $V$  – az oldat térfogata, L,  $\tau$  – mérési idő, s.

– Ezek segítségével meghatározzuk a porózus anyag effektív diffúziós állandóját:

$$D_{ef} = \frac{\delta}{C_{HCl}^{1a} - C_{HCl}} \cdot \bar{n}_{HCl}, \text{ m}^2/\text{s} \quad (2.11.7)$$

ahol:  $\delta$  – a membrán vastagsága, m,  $C_{HCl}^1$ ,  $C_{HCl}$  – a kezdeti (1a edényben), illetve a végső (mintában) mért hidrogén-klorid koncentráció,  $\bar{n}_{HCl}$  – a hidrogén-klorid áramsűrűsége, mol/m<sup>2</sup>s, (2.11.6) összefüggés).



## MŰVELETEKKEL KAPCSOLATOS MÉRÉSI GYAKORLATOK

### HIDRODINAMIKAI MŰVELETEK

#### 3.1. Keverőelemek hatékonyságának gyakorlati meghatározása

A keverésnél két vagy több anyagot kényszerített áramlással egyesítünk azért, hogy az eloszlásuk a meghatározott térfogatelemben egyenletes legyen. Két különböző töménységű folyadék esetén a keveréssel létrehozott áramlással koncentrációegyenlőséget hozunk létre. Tehát ha a koncentrációváltozást vesszük figyelembe, akkor egy kis idő múlva beáll az állandó, egyenletes koncentrációérték.

Kétfázisú keverés esetén (például a só és a víz keverése esetében) a feladat nem csak a homogén oldat előállítására, hanem az oldódási sebesség növelésére. A keveréssel áramoltatott folyadék mozgási energiája legyőzheti nemcsak a só felületén lévő telített oldat energiáját, elmozdítván onnan, hanem még a sókristályokat is magával ragadja, és egy szuszpenziót hoz létre. Így minden sókristály folyadékkal lesz körülvéve. Mivel a kristályok relatív mozgási sebessége nagy, a felületi lamináris határreteg nagyon vékonyra válik, ami elősegíti a komponens diffúzió sebesség növelését és egyúttal az oldódási idő csökkentését (Szép–Molnos–András 2017).

A keverőberendezések alkotóelemeit a közegek minősége és a kívánt végtermékek tulajdonságai szabják meg. Homogén anyagok keverésénél a legnagyobb térfogatú közeg a folyadék. Ez lehet kis vagy nagy viszkozitású. Kis viszkozitású folyadék esetén a keverőberendezés egy álló edényből és mechanikai keverőből áll, nagyobb viszkozitású közegeknél kettő vagy több keverőre is szükség lehet. Nagy viszkozitású pépes anyagok keverésekor különböző geometriájú keverőket használnak, melyek tengelyei lehetnek függőleges, dőlt vagy vízszintes állásban (Fonyó–Fábrı 2004). Poroknál vagy a kis folyadékmennyiséget tartalmazó anyagoknál olyan keverőberendezések használhatók, amelyeknél az edény mozog (Fonyó–Fábrı 2004; Bratu 1984a).

Kis viszkozitású anyagok keverése különböző lapát-, propeller- vagy turbínakeverővel történik. A folyadékban mozgó lapát és a folyadék közt az  $F_e$  ellenállási erő lép fel (Fonyó–Fábrı 2004; Heldmann–Lund 2007):

$$F_e = C_f \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A_L \quad (3.1.1)$$

ahol:  $F_e$  – áramlás ellenében fellépő erő, N,  $C_f$  – közegellenállási tényező,  $v_L$  – a lapát közepes kerületi sebessége, m/s,  $A_L$  – a lapát felülete, m<sup>2</sup>,  $\rho$  – a folyadék sűrűsége, kg/m<sup>3</sup>.

Ha a lapát felületét a forgási átmérő sokszorosának ( $k$ -szorosának) vesszük (lásd a 3.1.1. ábrát), akkor felírható:

$$A_L = k \cdot d^2 \quad (3.1.2)$$

A lapát közepes kerületi sebessége pedig:

$$v_L = x \cdot \varpi = k \cdot d \cdot \varpi = k \cdot d \cdot 2\pi \cdot n = k_2 \cdot n \cdot d \quad (3.1.3)$$

Behelyettesítve a (3.1.1.) összefüggésbe, következik:

$$F_e = C_f \cdot \frac{\rho \cdot k_2^2 \cdot n^2 \cdot d^2}{2} \cdot k \cdot d^2 = C_f \cdot k_3 \cdot \rho \cdot n^2 \cdot d^4 \quad (3.1.4)$$

A keverő teljesítményszükséglete (P) a forgatónyomaték ( $M = F_e \cdot x$ ) és a szögsebesség ( $\varpi$ ) szorzata (Fonyó–Fábrí 2004; Green–Perry 2008), vagyis:

$$P = M \cdot \varpi = (C_f \cdot k_3 \cdot \rho \cdot n^2 \cdot d^4) \cdot (k \cdot d) \cdot (2\pi \cdot n) = C_f \cdot k_4 \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (3.1.5)$$

A  $k$ – $k_4$  állandók különböző mértani arányokat fejeznek ki a  $d$  függvényében.

Ha a  $C_f \cdot k_4$  szorzatot, mely csak gyakorlati úton határozható meg,  $\zeta$ -val jelöljük, és keverési ellenállási tényezőnek nevezzük, a (3.1.5) összefüggést felírhatjuk:

$$P = \zeta \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (3.1.6)$$

A  $\zeta$  tényezőt *keverési Euler-számnak* is nevezik (Fonyó–Fábrí 2004; Singh–Heldman 2009; Heldmann–Lund 2007), tehát felírhatjuk:

$$\frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5} = \zeta = Eu_k \quad (3.1.7)$$

Kísérleti adatok feldolgozásával meghatározták, hogy a keverő teljesítményszükségletét a következő összefüggés írja le (Fonyó–Fábrí 2004; Bratu 1984; Cristian–Horoba–Mureşan 2005):

$$Eu_k = C \cdot Re_k^m \cdot Fr_k^{-n^*} \quad (3.1.8)$$

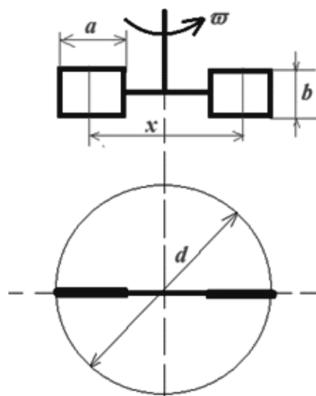
ahol:  $Eu_k$  – a keverési Euler-szám [(3.1.7) összefüggés];  $Re_k$  – a keverési Reynolds-szám ( $Re_k = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\eta} = \frac{n \cdot d^2}{\nu}$ );  $Fr_k$  – a keverési Froude-szám, mely az egységnyi tömrege ható centrifugális erő és nehézségi erő aránya ( $Fr_k = \frac{d \cdot n^2}{g}$ );  $C$  – a keverő típusától függő, gyakorlatilag mért szám;  $m$ ,  $n^*$  – kísérleti úton meghatározható kitevők.

A keverés jellegének függvényében a (3.1.8.) összefüggést fel lehet írni egyszerűbb formában. Ahhoz, hogy a keveréskor keletkezett tölcser ne diszpergáljon levegőt a folyadékba, vagyis a tölcser ne érintse a keverőt, az  $n^* = 1$ , és az összefüggés pedig a következő formát ölti (Fonyó–Fábrí 2004):

$$Eu_k = C \cdot Re_k^m \quad (3.1.9)$$

Lamináris áramláskor ( $Re=10$ – $60$ ) az  $m$  értéke 1, tehát az összefüggés leírható (Fonyó–Fábrí 2004):

$$Eu_k = C \cdot Re_k^{-1} \quad (3.1.10)$$



**3.1.1. ábra.** A lapátkeverő vázlatja:

$d$  – forgási átmérő,  $x$  – a lapát központ tengelytávolsága ( $3d/8$ ),  $axb$  – a lapát mérete

Turbulens áramláskor ( $Re > 1000$ ) az  $m$  értéke 0,2, torlólemezzel ellátott keverőkád esetén pedig  $m = 0$  (Fonyó–Fábrí 2004), és így az összefüggés a következő formát veszi fel:

$$Eu_k = C \cdot Re_k^{-0,2} \text{ vagy } Eu_k = C \quad (3.1.11)$$

A teljesítményszükségletet az áramlás jellegétől függően számítjuk ki. Lamináris áramláskor (Singh–Heldman 2009; Fonyó–Fábrí 2004):

$$P = C \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \cdot Re^{-1} = C \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot n \cdot d^2} = C \cdot n^2 \cdot d^3 \cdot \eta \quad (3.1.12)$$

Turbulens áramláskor általában (Bratu 1984a; Tudose et alii 2001):

$$P = C \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (3.1.13)$$

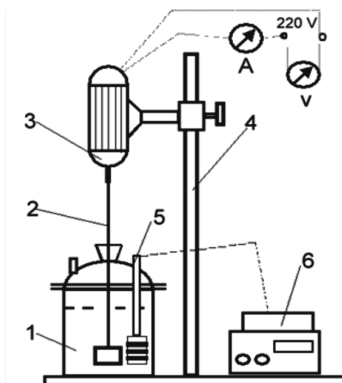
### A gyakorlat célja:

- A keverés hatékonyságának gyakorlati meghatározása három különböző típusú keverőelem esetén.
- A mért paraméterek segítségével kiszámított teljesítményszükséglet és a reális teljesítmény összehasonlítása.

### A gyakorlati berendezés:

A gyakorlati berendezés egy elektromos motorra felszerelt keverőt, keverőedényt és egy konduktométert tartalmaz (lásd a 3.1.2. ábrát). A teljesítmény mérésére a berendezés voltmérőt, ampermérőt vagy egy áramkörbe beépített wattmérőt tartalmaz.





**3.1.2. ábra.** Keverőelemek hatékonyságának gyakorlati meghatározása:

1 – reaktor, 2 – keverő, 3 – motor, 4 – állvány, 5 – konduktométer szondája, 6 – konduktométer, A – ampermérő, V – voltmérő

### A mérési feladat:

- A gyakorlat megkezdése előtt lemérjük a keverők jellemzőit (forgási átmérő, lapátvastagság).
- Kiolvassuk a kézikönyvből/útmutatóból a 60 g/L-es sólé sűrűségét és viszkozitását.
- Kiszámítjuk az adott keverési Reynolds-számnak megfelelő fordulatszámot.
- Felszereljük az első keverőt a keverőtartóra. Beállítjuk a keverő magasságát úgy, hogy az edény és a keverő között mindig 2 cm legyen a távolság.
- Ezután a keverőedénybe töltünk 500 mL desztillált vizet, behelyezzük a konduktométer szondáját, bekapcsoljuk a konduktométert, és beállítjuk a szükséges keverési fordulatszámot.
- Kimérünk 30 g örölt sót, tölcser segítségével betöltjük az edénybe, és beindítjuk a kronométert.
- A konduktométer skálájáról leolvassuk és a 3.1.1. táblázatba beírjuk az oldat vezetőképességét, eleinte percenként, majd 5 perces intervallumokban.

**3.1.1. táblázat.** Különböző keverőkkel mért adatok

S.sz.	1. keverő		2. keverő		3. keverő	
	$\tau$ , perc	$\lambda$ , mS	$\tau$ , perc	$\lambda$ , mS	$\tau$ , perc	$\lambda$ , mS

– Amikor az utolsó két leolvasott adat között kicsi a különbség, akkor leolvassuk az ampermérő és a voltmérő jelét, ezután megállítjuk a motort és kikapcsoljuk a konduktométert, majd egy új mérésre készítjük elő a berendezést.

– A táblázati adatok segítségével megszerkesztjük a  $\lambda \leftrightarrow \tau$  görbét. Kiszámoljuk a görbék meredekségét, és ezek szerint rangsoroljuk a keverőket.

– Felhasználva a többi mért adatot, kiszámítjuk a keverők teljesítményszükségletét, és összehasonlítjuk a mért adatokkal (lásd a 3.1.2. táblázatot).

### 3.1.2. táblázat. Mért és számított adatok

Keverőtípus	Az oldat tulajdonsága		$n$ , $s^{-1}$	$U$ , $V$	$I$ , $A$	Keverőtípus- állandó (C)*	$P, W$	
	$\rho$ , $kg/m^3$	$\eta$ , $Pa \cdot s$					Mért	Számított

\*Az állandókat a mellékletből olvassuk ki a keverőtípus függvényében.

## 3.2. A szűrési állandók gyakorlati meghatározása vákuum- és nyomás alatti szűréskor

A szűrés a nyomáskülönbség hatására végbemenő fázisváltási művelet. Célja elválasztani a szilárd részecskéket a fluidumtól. A nyomáskülönbséget szintkülönbséggel, szivattyúval vagy vákuumszivattyúval lehet biztosítani. A szétválasztás megkövetel egy porózus szűrőközeget (szűrőkendő, szűrőszövet, posztó stb.) és az azt felfogó szűrőrácst. Ennek az utóbbinak az ellenállása a szűrőkendő és az iszaplepeny ellenállásával szemben elhanyagolható.

A szűrést lehet állandó nyomáson vagy állandó sebességgel végezni. Laboratóriumi szinten általában az állandó nyomásos, szakaszos szűrést alkalmazzák (Tudose et alii 2001). Ha elhanyagoljuk a szerelvényben fellépő nyomásvesztéseket, a szűréshez szükséges hajtóerő (nyomáskülönbség) a szűrőközeg és az iszaplepeny ellenállásának a legyőzésére szükséges. Mint ahogy az előadás alkalmával is említettük, a Carman-féle szűrési egyenlet a következő egyszerűsítéseket feltételezi:

- a szűrőközeg és a lepeny ugyanannyi számú pórust tartalmaz;
- a pórusokban az áramlás lamináris;
- a szűrési sebességet egységnyi idő alatt, egységnyi felületen átfolyt fluidummal fejezzük ki  $v_{sz} = \frac{dV}{F \cdot d\tau}$ ,  $\frac{m^3}{m^2 \cdot s}$ ;

- az iszaplepeny vastagsága a részecskék összetorlódásának köszönhető.

Tehát ha a szuszpenzió szilárdanyag-tartalma  $C$  (kg/m<sup>3</sup>) és a gyűjtött szűrlet térfogata  $V$ , akkor az  $F$  felületen összegyűjtött lepény vastagsága:

$$m_{sz} = \rho_{sz} \cdot V_{sz} = \rho_{sz} \cdot h_1 \cdot F = V \cdot C \Rightarrow h_1 = \frac{V \cdot C}{\rho_{sz} \cdot F}, \text{ m} \quad (3.2.1)$$

ahol:  $V_{sz}$  – a szilárd anyag térfogata, m<sup>3</sup>,  $\rho_{sz}$  – a szilárd anyag sűrűsége, kg/m<sup>3</sup>,  $h_1$  – a lepény vastagsága, m.

Így a lepény nyomásvesztése:

$$\Delta p_1 = \left( \frac{dV}{d\tau} \right) \cdot \left( \frac{V}{F^2} \right) \cdot \left( \frac{r_L}{\rho_{sz}} \right) \cdot \eta \cdot C = \left( \frac{dV}{d\tau} \right) \cdot \left( \frac{V}{F^2} \right) \cdot r_L \cdot \eta \cdot C \quad (3.2.2)$$

ahol: az  $r_L$  – a fajlagos lepényellenállás, a  $C$  – az egységnyi térfogatú szűrletből felhalmozódott részecskék tömege, kg/m<sup>3</sup>,  $V$  – a szűrlet térfogata, m<sup>3</sup>,  $F$  – szűrőfelület, m<sup>2</sup>,  $\eta$  – a szűrlet viszkozitása, Pa·s.

A szűrőközeg ellenállása felírható:

$$\Delta p_2 = \left( \frac{dV}{d\tau} \right) \cdot \frac{\eta}{F} \cdot r_2 \cdot h_2 \quad (3.2.3)$$

Mivel a közegvastagság ( $h_2$ ) konstans, a  $r_2 \cdot h_2$  szorzatot membránellenállásnak nevezve ( $R_m$ ), a szűrőközeg nyomásvesztése:

$$\Delta p_2 = \left( \frac{dV}{d\tau} \right) \cdot \frac{\eta}{F} \cdot R_m \quad (3.2.4)$$

Az összes nyomásvesztés a két réteg ellenállásából adódik, tehát felírhatjuk:

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = \frac{dV}{F \cdot d\tau} \cdot \eta \cdot \left( \frac{V}{F} \cdot r_L \cdot C + R_m \right) \quad (3.2.5)$$

Innen kapjuk a **Carman-féle szűrési egyenletet** (Fonyó–Fábrri 2004; Bratu 1984a):

$$\frac{dV}{F \cdot d\tau} = \frac{\Delta p}{\eta \cdot \left( \frac{V}{F} \cdot r_L \cdot C + R_m \right)}, \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad (3.2.6)$$

Integrálva az egyenletet állandó nyomáson, a következő összefüggést kapjuk:

$$\tau = \frac{\eta}{\Delta p} \cdot \left( \frac{r_L \cdot C}{2} \cdot \frac{V^2}{F^2} + R_m \cdot \frac{V}{F} \right), \text{ s} \quad (3.2.7)$$

Látható, hogy a szakaszos szűrés ideje nő a szűrlet négyzetével, ami azt jelenti, hogy a szűrési idő teltével az egységnyi idő alatt gyűjtött szűrlet mennyisége csökken, ami az iszaplepény ellenállásának növekedésével magyarázható.

A Carman-féle szűrési egyenlet állandói gyakorlati úton határozhatók meg. A (3.2.7)-es egyenletet fel lehet írni más formában is, éspedig:

$$\frac{\tau}{V} = \frac{\eta \cdot r_L \cdot C}{2 \cdot \Delta p \cdot F^2} \cdot V + \frac{R_m \cdot \eta}{\Delta p \cdot F} \quad (3.2.8)$$

$$\text{Vagy: } \frac{\Delta \tau}{\Delta V} = a \cdot V + b, \text{ ahol: } a = \frac{\eta \cdot r_L \cdot C}{2 \cdot \Delta p \cdot F^2}, b = \frac{R_m \cdot \eta}{\Delta p \cdot F} \quad (3.2.9)$$

amelyben a  $\Delta V$  a közepes gyűjtött térfogat, m<sup>3</sup>.

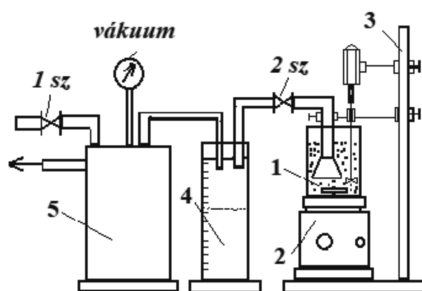
### 3.2.1. A szűrési egyenlet állandóinak gyakorlati meghatározása vákuumszűrés esetén

#### A gyakorlat célja:

A szűrési művelet megismerése, az állandó nyomáson végzett szűrés állandóinak a meghatározása gyakorlati úton.

#### A vákuumszűrési gyakorlati berendezés:

A szakaszos szűrés gyakorlati tanulmányozására a 3.2.1. ábrán vázlatosan bemutatott készüléket használjuk. A készülék tartalmaz egy szuszpenzió-előállításra alkalmas edényt (1), keverővel (2) és szűrőközegetartóval (3) ellátva, egy mérőhengert (4), egy vákuumedényt (5), manométerrel és csappal (1 sz) ellátva.



**3.2.1. ábra.** A szűrési egyenlet állandóinak meghatározására szolgáló berendezés vázlata:

1 – mechanikus vagy mágneses keverővel ellátott, szuszpenziót előállító edény, szűrőbetéttel, 2 – mágneses keverő, 3 – villanymotor tartóállványra szerelve, 4 – mérőhenger, 5 – pufferedény vákuumméterrel, 1 sz, 2 sz – csapok

#### A szűrési művelet és az elvégzendő számítások:

- Mielőtt a gyakorlatot megkezdenénk, vizsgáljuk meg a szűrőberendezés összes csatlakozását és a fojtószelepek állását (az 1 sz és a 2 sz zárva kell legyen).
- Mérjük meg a szűrőközegetartó átmérőjét, és szereljük a szűrőközeget a tartóba.
- Az (1) edénybe töltünk be 750 mL desztillált vizet, és adjunk hozzá 100 g kalcium-karbonátot (szuszpenziót készítünk).
- Beindítjuk a keverőt és a vákuumszivattyút.
- Miután a homogén szuszpenziót előállítottuk (nincs csomós karbonát az edényben), a (2 sz) szelep segítségével állítsuk be a nyomást és nyissuk meg az (1 sz) szelepet.

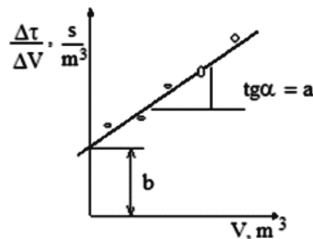
- Abban a pillanatban, amikor megjelenik a mérőhengerben az első csepp szűrlet, megindítjuk a kronométert.
- Mérjük kb. 10 egyenlő térfogatmennyiség gyűjtéséhez szükséges időt, a mért adatokat a 3.2.1. táblázatban rögzítjük.

**3.2.1. táblázat.** A szűréskor mért és számított adatok,  $\Delta h = \dots\dots\dots$

S. sz.	$\tau$ , s	$\Delta\tau$ , s	V		$\Delta V$ , m <sup>3</sup>	$\frac{\Delta\tau}{\Delta V}$	$\Delta h$ , mm	$\Delta p$ , Pa	t, °C
			mL	m <sup>3</sup>					

A mérés befejeztével, a vákuum elzárása nélkül vegyük ki a szűrőt, és mérjük meg a lepény vastagságát. Ezt követően egy újabb kísérletre állítsuk be a berendezést, de ebben az esetben ugyanazzal a szuszpenzióval dolgozzunk, mint az előbb, csupán a nyomást állítsuk kisebb értékre.

Az adatok segítségével milliméterpapírra (vagy Excel környezetben) rajzoljuk meg a  $\frac{\Delta\tau}{\Delta V} \leftrightarrow V$  diagramot (lásd a 3.2.2. ábrát), és határozzuk meg a szűrési állandókat (a-t és b-t).



**3.2.2. ábra.** A szűrési állandók grafikus meghatározása

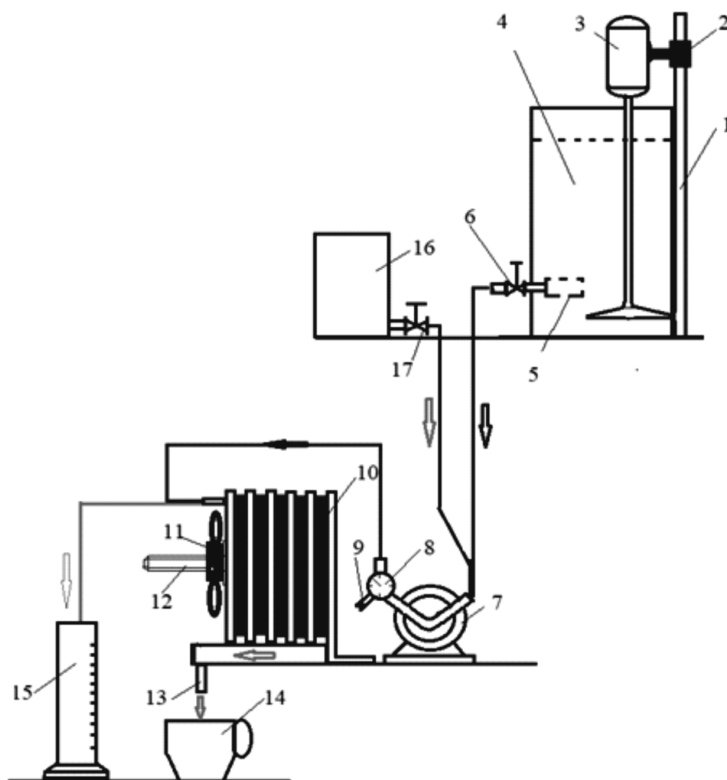
### 3.2.2. A szűrés állandóinak gyakorlati meghatározása prösszűrővel

#### A gyakorlat célja:

A gyakorlatnak kettős célja van: egyrészt megismerni a prösszűrő működési elvét, majd a szűrési egyenlet állandóinak meghatározási módját a prösszűrő esetében.

### A gyakorlati berendezés:

A szakaszos prösszűrő működésének gyakorlati tanulmányozására a 3.2.3. ábrán vázlatosan bemutatott készüléket használjuk.



**3.2.3. ábra.** A prösszűrő vázolata:

- 1 – állvány, 2 – keverőfelfogó, 3 – lapátkeverő hajtómotorral, 4 – szuszpenziótartály, 5 – szívófej,  
6 – csap, 7 – örvényszivattyú, 8 – manométer, 9 – térfogatáram-szabályozó, 10 – prösszűrő,  
11 – szorító pillangó anyacsavar, 12 – csavar, 13 – gyűjtőtálca lefolyóval, 14 – gyűjtő,  
15 – mérőhenger, 16 – feltöltőedény, 17 – csap

Mint látható, a laboratóriumi készülék egy szuszpenzió-előállításra alkalmas edényből (4) áll, amelyhez egy állványra (1) szerelt lapátkeverő (3) és egy szívókosár (5) tartozik. Az állandó összetételű szuszpenziót az örvényszivattyú (7) szállítja a prösszűrőbe (10). A térfogatáram és egyúttal a nyomás szabályozására szolgál a manométerrel (8) ellátott csap (9). A szűrőközeg megfelelő beiktatását szolgálja a két pillangó anyacsavarral (11) ellátott szorító. A kezdeti szívárgást egy túlfolyóval ellátott tálcában (13) gyűjtjük össze, ahonnan a (14) edénybe jut. A szűrlet térfogatának mérésére szolgál a (15) mérőhenger.

### A szűrési művelet és az elvégzendő számítások:

A mérés feltételezi a következő műveleteket:

– A *szűrő összeszerelése*: az előzőleg meghatározott méretű szűrőkeret közé iktassunk be 1-1 szűrőközeget (szűrőkartont), és a két pillangó anyacsavar segítségével egyenletesen szorítsuk meg.

– A vízzel töltött (16) edény csapját (17) megnyitva *feltöltjük a rendszert*: miután a tálcagyűjtő kifolyóját bevezetjük a gyűjtőedénybe (14), a motoron található kapcsoló segítségével beindítjuk az örvényszivattyút (7). Ha szivárgást tapasztalunk, akkor a pillangó anyacsavarokkal tovább szorítjuk a szűrőt mindaddig, amíg eláll a szivárgás. Ezt követően elzárjuk a (17) csapot és leállítjuk az örvényszivattyút.

– A *szuszpenzió előállítás*a: a (4) edénybe betöltünk 10 L vizet, és a keverőmotor (3) bekapcsolása után hozzáadjuk a technikai mérlegen előzetesen kimért kalcium-karbonátot. A kalcium-karbonát szükséges mennyiségét úgy kell meghatározni, hogy az egyenletes eloszlás után a koncentráció 125 g/L legyen.

– *Szűrési mérés*: miután a homogén szuszpenziót előállítottuk (nincs csomós karbonát az edényben), kinyitjuk a (6) csapot, és beindítjuk az örvényszivattyút (7). Abban a pillanatban, amikor megjelenik a mérőhengerben (15) az első csepp szűrlet, megindítjuk a kronométert, amellyel mérjük meg legalább 10 egyenlő térfogtmennyiség átfolyásához szükséges időt. A mért adatokat – mérési idő, mért térfogat, nyomás, hőmérséklet – a 3.2.2. táblázatban rögzítjük. Amikor a mérőhenger megtelt, leállítjuk az örvényszivattyút, és feldolgozzuk az adatokat.

A mérési adatok segítségével kiszámítjuk a 3.2.2. táblázatban feltüntetett mennyiségeket, majd azok segítségével milliméterpapírra vagy Excel környezetben megrajzoljuk a  $\frac{\Delta\tau}{\Delta V} \leftrightarrow V$  diagramot (lásd a 3.2.2. ábrát), és meghatározzuk a szűrési állandókat ( $a$ -t és  $b$ -t).

**3.2.2. táblázat.** A szűréskor mért és számított adatok

S. sz.	$\tau$ , s	$V$		$\Delta V$ , m <sup>3</sup>	$\Delta\tau$ , S	$\frac{\Delta\tau}{\Delta V}$	$p$ , Pa	$t$ , °C
		mL	m <sup>3</sup>					
1	0	0	0	0	0	–		
2								
3								

Ha szükséges (az adatokból nem lehetséges az állandók kiszámítása), egy újabb kísérletre állítjuk be a berendezést. Ebben az esetben a szuszpenzió meglévé, csak a mérést ismételjük meg.

A szakaszos szűrésre jellemző, hogy a szűrőlepeny eltávolítása alatt ( $t_a$ ) a szűrő nem termel, tehát a valódi szűrési teljesítmény értékét úgy számíthatjuk

ki, hogy a kapott szűrletmennyiséget elosztjuk a szűrési és az állási idő összegével, vagyis:

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{V}{\tau_{sz} + \tau_a} \quad (3.2.10)$$

Innen:

$$\frac{1}{\dot{V}} = \frac{\Delta\tau}{\Delta V} = \frac{\tau_{sz} + \tau_a}{V} \quad (3.2.11)$$

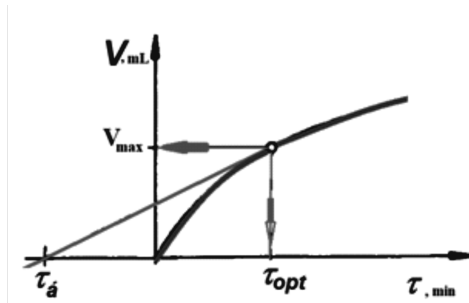
A szűrési egyenletnek akkor van minimuma, ha az első derivált értéke zéró ( $2aV + b = 0$ ) és a másodiké pozitív ( $2a > 0$ ), tehát felírható:

$$2aV + b = 0 = \frac{\tau_{sz} + \tau_a}{V} \quad (3.2.12)$$

Innen következik, hogy a szűrési teljesítmény akkor maximális, amikor a szűrési idő és az állási idő egyenlő, vagyis:

$$\dot{V}_{\max} = \frac{V}{\tau_{sz} + \tau_a} = \frac{V}{2\tau_{sz}} \quad (3.2.13)$$

Az optimális szűrési idő és a maximális szűrési teljesítmény értékét a mért  $V - \tau$  adatok segítségével is meghatározhatjuk, úgy, hogy a  $\tau_a$  pontból érintőt húzunk a  $V = f(\tau)$  görbére (lásd a 3.2.4. ábrát).



**3.2.4. ábra.** Az optimális idő és a maximális szűrletáram meghatározása grafikus módszerrel





# HŐÁTADÁSI MŰVELETEK

## 3.3. Az instacionárius állapotú hőátadás gyakorlati vizsgálata

A hőátadás háromféle mechanizmussal történhet: vezetéssel (kondukciónal), áramlással (konvekcióval) és sugárzással. A közeg és a hőmérséklet függvényében változó a domináns mechanizmus. Szilárd közeg esetében alacsonyabb hőmérsékleten a vezetés dominál, áramló fluidumnál a hőkonvekció, magas hőmérsékletű közegek esetében a sugárzással átadott hő a domináns (Bratu 1984b; Stoica et alii 2007; Horoba 2004).

A **hővezetés** a testek nagyon kis részecskéi – szabad elektronok, ionok, molekulák stb. – által valósul meg. A nagy energiatartalmú részecskék, ütközve a kisebb energiatartalmú részecskékkel, átadják azoknak energiatöbbletük egy részét. A felvett energiával a részecske hőmozgásának intenzitását növeli, tehát hőmérséklete nő. Így az energia részecskéről részecskére terjedve halad át a testen.

Az egységnyi felületen áthaladó energiamentységet a következő összefüggés adja meg:

$$\frac{\dot{Q}}{F} = q_v = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T^0 - T), \text{ W/m}^2 \quad (3.3.1)$$

ahol:  $\dot{Q}$  – a hőáram, J/s;  $F$  – a hőterjedés irányára merőleges felület,  $\text{m}^2$ ;  $\delta$  – a közeg vastagsága, m;  $\lambda$  – a közeg hővezetési tényezője,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $(T^0 - T)$  – a közeg két pontja között fellépő hőmérséklet-különbség, K.

**Konvekciós** hőátadás esetén az áramló közeg részt vállal a hőtranszportban. Nagyobb potenciális és hőenergiával rendelkező közeg részecskéi különböző sebességgel különböző irányba mozogva az anyagszállítással együtt hőenergiát is szállítanak. Ha egy melegebb közeg keveredik egy hidegebbel, hőátadás jön létre. Szabad vagy természetes áramlásról akkor beszélünk, ha a közeg egyes részei a hőmérséklet által okozott sűrűségkülönbség hatására áramolnak. Kényszeráramlásról akkor beszélünk, ha a részecskéket egy konvekciós áramlás ragadja magával. Hővezetés esetén a részecskék nem változtatják helyüket, szabad- vagy kényszerkonvekció esetén a részecskecsoportok (térfogatelemek) áramlásban vannak, melynek hajtóereje lehet természetes (például a sűrűségkülönbség,  $\Delta\rho$ ) vagy külső behatással előidézett.

Az egységnyi felületen átadott hőmennyiséget a Newton-féle összefüggés írja le (Fonyó–Fábri 2004):

$$\frac{\dot{Q}}{F} = q_k = \alpha \cdot (T^0 - T), \text{ W/m}^2 \quad (3.3.2)$$

ahol:  $\dot{Q}$  – a hőáram, J/s;  $F$  – a hőterjedés irányára merőleges felület,  $\text{m}^2$ ;  $\alpha$  – a közeg hőátadási tényezője,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $(T^0 - T)$  – a transzport hajtóereje, vagyis a meleg rész és a hideg rész hőmérséklet-különbsége, K.

**Hősugárzás** esetén a transzport a test által kibocsátott hősugarak közvetítésével (elektromágneses sugárzás infravörös tartománya) történik. A sugarak, ha útjukban találkoznak egy másik testtel, leadják energiájukat, felmelegítve a testet. Sugárzáskor a hőenergia átalakul hősugárrá, míg elnyeléskor a sugárzási energia alakul át hőenergiává. Ebben az esetben az egységnyi felületen átadott hőmennyiséget a Stefan–Boltzmann-féle összefüggéssel (3.3.3) számítjuk (Fonyó–Fábrí 2004):

$$\frac{\dot{Q}}{F} = q_s = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4), \text{ W/m}^2 \quad (3.3.3)$$

ahol:  $\dot{Q}$  – a hőáram, J/s;  $F$  – felület,  $\text{m}^2$ ;  $\sigma$  – az abszolút feketetest sugárzási állandója [ $5,676 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ];  $\varepsilon$  – emissziós állandó, mely figyelembe veszi a sugárzó test felületének hőkibocsátó képességét;  $T_1, T_2$  – a sugárzó, illetve a sugárzott test/közeg felületének hőmérséklete, K.

Az **instacionárius állapotú hőátbocsátás tanulmányozására** egy folyadék-folyadék hőcserét vizsgálunk. Egy jól szigetelt üstben lévő 343–353 K hőmérsékletű vizet hűtünk csökígyóban áramló hideg vízzel. A hűtés kezdeti pillanatától az üstben levő víz hőmérséklete folytonosan csökken, míg a hűtővízzé nő. Az egyre csökkenő hőmérsékletű meleg víz fűtőképessége csökken, így a betáplált hűtővíz hőmérséklet-emelkedése is idővel egyre kisebb.

Ha ismertek: az üstben levő folyadék kezdeti hőmérséklete,  $T_1^0$ , a csökígyóba belépő folyadék hőmérséklete,  $T_2^0$ , a geometriai adatok, valamint a hőtani tulajdonságok, a nagyon kis  $dt$  idő alatt a hőátbocsátást stacionáriusnak véve felírható a két folyadék között átadott hő mennyisége,  $dQ$ .

$$\text{A meleg folyadék által átadott hő: } dQ = -m_1 \cdot c_{p1} \cdot dT_1 \quad (3.3.4)$$

A hideg folyadék által felvett hő pedig:

$$dQ = m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_2 - T_2^0) \cdot d\tau \quad (3.3.5)$$

A két fluidum között cserélt hőmennyiség értéke:

$$dQ = K \cdot F_{cs.k.} \cdot \Delta T_a \cdot d\tau \quad (3.3.6)$$

ahol: az  $F_{cs.k.}$  – a csökígyó hőátadási felülete,  $\text{m}^2$ ,  $K$  – hőátbocsátási tényező,  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ,  $\Delta T_a$  – a logaritmusos közepes hőmérséklet-különbség, K.

Kifejezve a  $\Delta T_a$ -t, felírható:

$$\Delta T_a = \frac{(T_1 - T_2^0) - (T_1 - dT_1 - T_2)}{\ln \frac{T_1 - T_2^0}{T_1 - dT_1 - T_2}} \approx \frac{T_2 - T_2^0}{\ln \frac{T_1 - T_2^0}{T_1 - T_2}} \quad (3.3.7)$$

Kiiktatva a  $(T_2 - T_2^0)$ -t a (3.3.5)–(3.3.7) összefüggésekből, felírható:

$$\ln \frac{T_1 - T_2^0}{T_1 - T_2} = \frac{K \cdot F_{cs.k.}}{m_2 \cdot c_{p2}} \quad (3.3.8)$$

Mivel a (3.3.8) összefüggés jobb oldala csak a berendezéstől függ, be lehet vezetni a  $B$  állandót:

$$B = \frac{T_1 - T_2^0}{T_1 - T_2} \quad (3.3.9)$$

Ennek segítségével felírható:

$$dQ = K \cdot F_{cs.k.} \cdot \frac{T_2 - T_2^0}{\ln B} d\tau \quad (3.3.10)$$

Kiemelve a  $T_2$ -t a (3.3.9) összefüggésből és behelyettesítve a (3.3.10) összefüggésbe, felírható:

$$dQ = K \cdot F_{cs.k.} \cdot \frac{T_1 - T_2^0}{B \cdot \ln B} \cdot (B - 1) d\tau \quad (3.3.11)$$

Behelyettesítve az 1. fluidumra felírt hőáramváltozást, és elvégezve az integrálást az 1. fluidum kezdeti és végső hőmérséklet-határai között, következik:

$$\begin{aligned} -m_1 \cdot c_{p1} \cdot dT_1 &= K \cdot F_{cs.k.} \cdot \frac{T_1 - T_2^0}{B \cdot \ln B} \cdot (B - 1) d\tau \Rightarrow \\ \Rightarrow - \int_{T_{1k}}^{T_{1v}} \frac{dT_1}{T_1 - T_2^0} &= \frac{K \cdot F_{cs.k.}}{m_1 \cdot c_{p1}} \cdot \frac{B - 1}{B \cdot \ln B} \cdot \int_0^\tau d\tau \Rightarrow \\ \Rightarrow \ln \frac{T_{1k} - T_2^0}{T_{1v} - T_2^0} &= \frac{K \cdot F_{cs.k.}}{m_1 \cdot c_{p1}} \cdot \frac{B - 1}{B \cdot \ln B} \cdot \tau \end{aligned} \quad (3.3.12)$$

Az 1. fluidum által leadott hőmennyiséget, a kezdeti hőmérséklettől a végső hőmérséklet eléréséig, a (3.3.4) összefüggés integrálásával kapjuk meg:

$$Q = m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{1k} - T_{1v}) \quad (3.3.13)$$

Behelyettesítve a (3.3.13) összefüggésből az  $m_1 \cdot c_{p1}$  szorzatot a (3.3.12) összefüggésbe, megkapjuk a cserélt hőmennyiséget:

$$Q = K \cdot F_{cs.k.} \cdot \frac{T_{1k} - T_{1v}}{\ln \frac{T_{1k} - T_2^0}{T_{1v} - T_2^0}} \cdot \frac{B - 1}{B \cdot \ln B} \cdot \tau \quad (3.3.14)$$

Ha  $\frac{T_{1k} - T_{1v}}{\ln \frac{T_{1k} - T_2^0}{T_{1v} - T_2^0}} \cdot \frac{B - 1}{B \cdot \ln B} = \Delta T_a$ -val jelöljük, akkor felírható az alapegyenlet:

$$Q = K \cdot F_{cs.k.} \cdot \Delta T_a \cdot \tau \quad (3.3.15)$$

ahol:  $K$  – hőátbocsátási tényező,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $F_{cs.k.}$  – a csőkígyó felülete,  $m^2$ ;  $\Delta T_a$  – közepes hőmérséklet-különbség,  $K$ ;  $\tau$  – a hűtés időtartama,  $s$ .

Ahhoz, hogy a  $K$  értékét meghatározzuk, kell ismernünk a meleg közeg hőmérsékletének időbeli változását, a közeg tulajdonságait ( $\rho_1$ ,  $c_{p1}$ ), a hűtővíz hőmérsékletének időbeli változását és a csőkígyó méreteit (csőátmérő és falvastagság,  $m$ ;  $D$  – csőkígyó átmérőjét,  $m$ ;  $n$  – menetszámát).

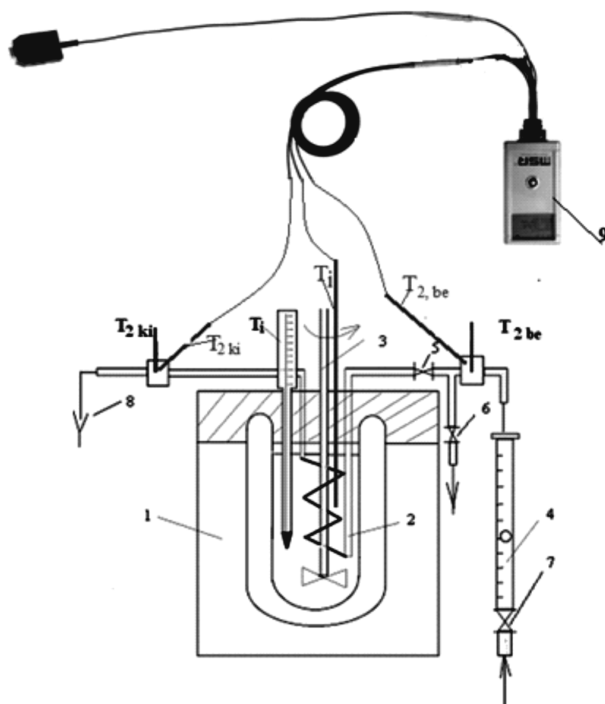
### A gyakorlat célja:

A hőátbocsátási tényező gyakorlati meghatározása különböző keverési intenzitás esetében.

### A berendezés leírása:

A 3.3.1. ábrán feltüntetett berendezés egy jól szigetelt, széles szájú Dewar-edénybe szerelt csőkégyő hűtőt ( $d = 8,6 \times 1,2$  mm, menetszám = 5, menetemelkedés = 8,5 mm), és szabályzóval, illetve LCD kiíróval rendelkező propellerkeverőt tartalmaz. A meleg közeg hőmérsékletének mérését egy beszerelt hőmérővel vagy szenorral ( $T_i$ ), a hűtővíz hőmérsékletét a csonkokra szerelt ( $T_{2be}$ , illetve  $T_{2ki}$ ) hőmérőkkel vagy szenzorokkal végezzük.

A térfogatáram meghatározására a beszerelt rotamétert használjuk. Ugyancsak a berendezés része a három szenorral rendelkező, számítógéphez csatlakoztatható adatgyűjtő is.



**3.3.1. ábra.** A gyakorlati berendezés vázlatja:

1 – hőszigetelt Dewar-edény (üstkeverő); 2 – csőkégyő; 3 – állítható fordulatszámú propellerkeverő;  
4 – rotaméter; 5, 6, 7 – csapok; 8 – lefolyó; 9 – számítógéphez csatlakoztatható adatgyűjtő;

$T_i$ ,  $T_{2be}$ ,  $T_{2ki}$  – hőmérők és/vagy hőmérsékletszenzorok

### Mérési feladat adatgyűjtő nélküli szerelésben:

A mérés megkezdése előtt megvizsgáljuk a berendezés állapotát (a hőmérők jelenlétét, a kapcsolást), és felszereljük a fordulatszabályzóval ellátott keverőt. Miután mindent rendben találtunk, odateszünk 750 mL desztillált vizet melegíteni. Elvégezzük a próbakeverést és beállítjuk a fordulatszámot, majd lezárjuk az 5-ös csapot, megnyitjuk a 6-os csapot, beállítjuk a hűtővíz térfogatáramát, és megmérjük annak hőmérsékletét.

A felmelegített desztillált vizet betöltjük a Dewar-edénybe, és beindítjuk a keverőt. Mielőtt kinyitnánk az 5-ös csapot és bezárnánk a 6-ost, leolvassuk a meleg víz hőmérsékletét, és elindítjuk a kronométert. Percenként leolvassuk a három hőmérő által mutatott hőmérsékleteket, és a 3.3.1. táblázatban rögzítjük.

3.3.1. táblázat. Mért adatok

S.sz.	Idő, s	Térfogatáram, $V_{\vec{v}}$ , m <sup>3</sup> /s	$T^p$ , K	$n$ , min <sup>-1</sup>	$T_{\vec{v}}$ , K	$T_{2be}$ , K	$T_{2ki}$ , K

### Mérési feladat adatgyűjtő alkalmazásával:

A mérés megkezdése előtt (a fentiekhez hasonlóan) ellenőrizzük a berendezés állapotát, behelyezzük a hőmérőszenzorokat a megjelölt helyekre és csatlakoztatjuk a hordozható MultiLog Pro márkájú adatgyűjtő (3.3.2. ábra) bemeneti csatornához (O/I-1, O/I-2, O/I-3, egy bemenet szabadon fog maradni). (Előzőleg győződjünk meg róla, hogy a készülék fel volt-e töltve, vagy biztosabb – lehetőség szerint –, ha a tápegységre csatlakoztatjuk.)

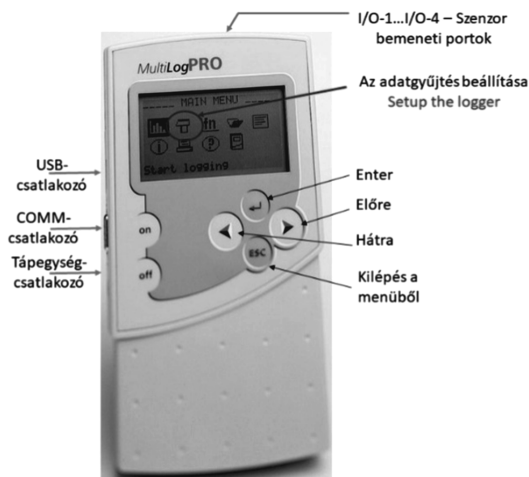
A készülék bekapcsolása után (megnyomva az ON gombot) az LCD kijelzőn látható ikonok közül az Előre gomb segítségével a második menüpontra lépünk (Setup the logger), az Enter megnyomása után pedig látni fogjuk, hogy melyik „port”-hoz csatlakozik szenzor.

Az Előre/Hátra gombok segítségével kiválasztjuk, hogy *milyen gyakorisággal történjen adatrögzítés*. A „RATE=” felirat után megjelenő listából kiválasztjuk az „Every min” lehetőséget, majd az Enter gomb megnyomásával a készülék automatikusan a következő beállítható menüpontra ugrik. Itt, ugyancsak az Előre/Hátra gombok segítségével, beállíthatjuk *a mintavételek számát* (pl. SAMPLES = 1000). Az Enter gomb megnyomása után beállítjuk, hogyan *jelenítse meg a készülék az adatokat mérés közben* (DISPLAY). Itt a „table” vagy a „numeric” megjelenítés ajánlott. „Enter”-rel mentjük ezt a beállítást is.

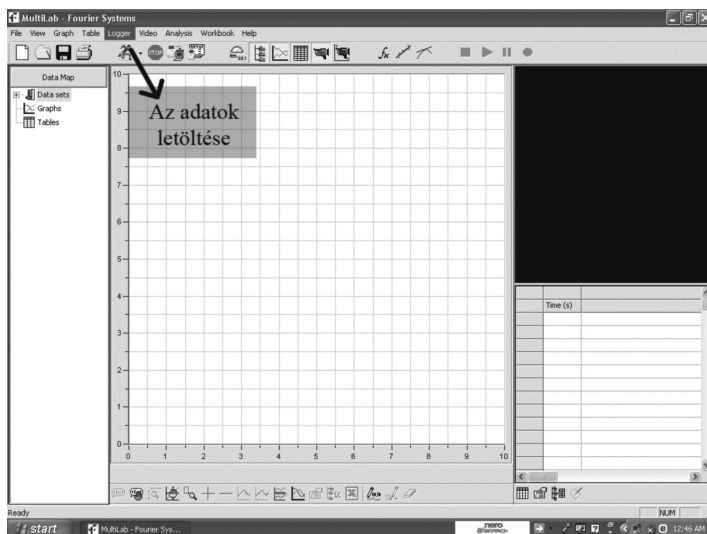
Miután az előbbi alponban leírtak szerint beállítottuk a keverő fordulatszámát ( $n$ ), a hűtővíz térfogatáramát ( $V$ ) és a felmelegített desztillált vizet a Dewar-edénybe betöltöttük, az *adatgyűjtés elkezdéséhez* (START) meg kell nyomni az Előre gombot. Az adatrögzítést bármikor befejezhetjük az Esc gomb segítségével.

A kísérlet befejezését követően az adatok számítógépre való mentése az alábbiak szerint következik:

1. Az USB-csatlakozón keresztül a készüléket a számítógéphez csatlakoztatjuk;
2. Elindítjuk a MultiLog programot (a megjelenő ablak a 3.3.3. ábrán látható);



**3.3.2. ábra.** A MultiLog PRO adatgyűjtő készülék



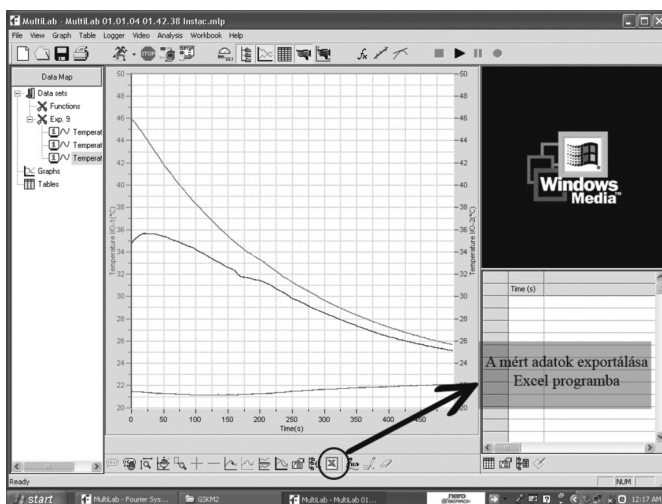
**3.3.3. ábra.** A MultiLog program munkafelülete

3. Kiválasztjuk a **Logger/Selective download** menüpont alatt a kísérlet számát (a legfrissebb kísérlet adatait az első file-ban találjuk), majd a **Download** gomb megnyomásával letöltjük az adatokat;

4. A letöltést követően az adatok grafikusan jelennek meg a program ablakában (lásd a 3.3.4. ábra);

5. A grafikon függőleges tengelyén jobb egérgombbal kattintva felugrik egy ablak, ahol megadhatjuk a mért értékek minimumát és maximumát (az Autoscale előtti négyzetből ki kell venni a pipát). Mindhárom szenzorral mért adatsor esetében ugyanazokat az értékeket adjuk meg (pl. min = 10, max = 50);

6. Az adatok exportálása az Excel programba: rákattintva az E ikonra (lásd a 3.3.4. ábra), az adatok táblázatos formában jelennek meg, ahonnan a **File/Save as** segítségével a kívánt helyre menthetjük az adatokat (pl. Desktop/Műveletlan lab/2019/{szak, csoport}).



**3.3.4. ábra.** A mért adatok grafikus megjelenítése a MultiLog programban

Ne felejtjük el a file nevét és kiterjesztését úgy módosítani, hogy a későbbi azonosítást megkönnyítse!

Egy újabb méréshez letöltjük az üstben levő vizet, újramelegítjük, és ezúttal egy eltérő fordulatszámon üzemeltetve a keverőt betöltjük a meleg vizet és mérjük a hőmérsékletet. Az újabb mérési adatokat egy másik táblázatban rögzítjük. A kísérleteket nemcsak a fordulatszám változtatásával, hanem a hűtővíz térfogat-áramának vagy a meleg közeg minőségének változtatásával is el lehet végezni.



### Számítások, eredmények kiértékelése:

A mért adatok segítségével minden fordulatszám esetén, minden időpontra meghatározzuk a hőátbocsátási tényező ( $K$ ) értékét, majd az eredményeket grafikusán ábrázoljuk.

A  $K$  értékeinek meghatározására a következő lépéseket tesszük:

– Kiszámítjuk a (3.3.9) összefüggéssel a  $B$  értékeit.

– Kiszámítjuk minden percre az átlagos (közepes) hőmérséklet- különbséget:

$$\Delta T_a = \frac{T_{1k} - T_{1v}}{\ln \frac{T_{1k} - T_2^0}{T_{1v} - T_2^0}} \cdot \frac{B - 1}{B \cdot \ln B} \quad (3.3.16)$$

– Kiszámítjuk a csőkígyó hőátadási felületét:

$$F_{csk} = \pi \cdot d \cdot L, \text{ ahol } d = \frac{d_k - d_b}{\ln \frac{d_k}{d_b}} \quad (3.3.17)$$

ahol:  $L$  – az előzőleg bemért vízbe mártott csőkígyó hossza, m;  $d$  – a cső külső belső közepes átmérője, m.

– Kiszámítjuk a meleg vízből percenként kivett hőmennyiséget:

$$Q = \rho_{v\acute{z}} \cdot V_{v\acute{z}} \cdot c_{p,v\acute{z}} \cdot (T^0 - T_i) \quad (3.3.18)$$

ahol:  $\rho_{v\acute{z}}$  – a meleg víz sűrűsége az átlaghőmérsékleten, kg/m<sup>3</sup>;  $V_{v\acute{z}}$  – az edénybe öntött meleg víz térfogata, m<sup>3</sup>;  $T^0$ ,  $T_i$  – a meleg víz kezdeti, illetve  $i$  pillanati hőmérséklete, K;  $c_{p,v\acute{z}}$  – a meleg víz fajhője az átlaghőmérsékleten, J/(kg·K).

– Kiszámítjuk a  $B$ , illetve a  $\Delta T_a$  értékeit.

– Kiszámítjuk a hőátbocsátási tényező értékét:

$$K_{m\acute{e}rt} = \frac{Q}{F_{csk} \cdot \Delta T_a \cdot \tau} \quad (3.3.19)$$

– A számított eredményeket a 3.3.2. táblázatban rögzítjük.

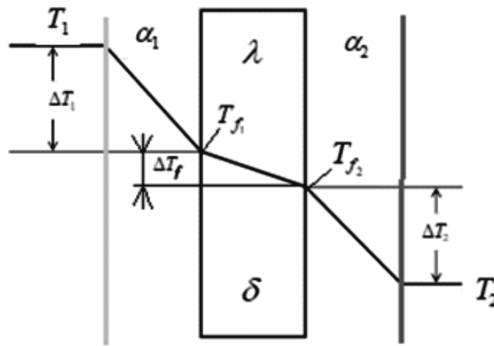
#### 3.3.2. táblázat. A mérések alapján számított eredmények

$\tau$ , s	$T_i$ , K	$T_{2ki}$ , K	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$c_{p1}$ , J/(kg·K)	$B$	$\Delta T_a$ , K	$K_{m\acute{e}rt}$ , W/(m <sup>2</sup> ·K)

– Megrajzoljuk a  $T_i$ ,  $T_{2ki}$  és  $K_{m\acute{e}rt}$  időbeli változását.

### 3.4. A stacionárius állapotú hőátbocsátás tanulmányozása cső a csőben típusú hőcserélőben

A közegek hűtésére vagy melegítésére nagyon sok esetben hőcserélőket alkalmaznak. Ezek legegyszerűbb változata a cső a csőben típusú, ahol az egyik fluidum a cső belsejében, míg a másik fluidum a két cső közötti térben áramlik. Az áramlás egyenáramú vagy ellenáramú lehet. Ha a két fluidumot elválasztó csőfalon nincs lerakódás, akkor a térfogatelemre a 3.4.1. ábrának megfelelő hőmérséklet-diagramot lehet felállítani. Mindkét fluidumban a fal mellett egy-egy lamináris határreteg keletkezik, amelyben fellép a hőátadást gátló ellenállás. A meleg közeg hőmérséklete  $T_1$ , míg a hidegé  $T_2$ . A fal hőmérséklete  $T_{f1}$ , illetve  $T_{f2}$ . Míg a két fluid rétegben a hőátadás konvekciós, a  $\delta$  vastagságú csőfalban vezetési.



3.4.1. ábra. A hőmérséklet változása a  $dF$  felületű elemi hőcserélő rendszerben

A  $dF$  egységnyi felületen áthaladt hőáram értékét ( $d\dot{Q}$ ) a következő összefüggésekkel számíthatjuk ki (Szép–Molnos–András 2017):

$$\text{– a meleg közeg felőli rétegben: } d\dot{Q} = \alpha_1 \cdot (T_1 - T_{f1}) \cdot dF \quad (3.4.1)$$

$$\text{– a csőfalon keresztül: } d\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_{f1} - T_{f2}) \cdot dF \quad (3.4.2)$$

$$\text{– a hideg közeg felőli rétegben: } d\dot{Q} = \alpha_2 \cdot (T_{f2} - T_2) \cdot dF \quad (3.4.3)$$

Stacionárius állapotban a három hőáram egyenlő, tehát ki tudjuk számítani a fal hőmérsékletét a mért  $T_1$  és  $T_2$  függvényében:

$$T_{f1} = -\frac{d\dot{Q}}{\alpha_1 \cdot dF} + T_1 \quad (3.4.4)$$

$$T_{f2} = \frac{d\dot{Q}}{\alpha_2 \cdot dF} + T_2 \quad (3.4.5)$$

Behelyettesítve a (3.4.2) összefüggésbe következnek:

$$d\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \left( T_1 - \frac{d\dot{Q}}{\alpha_1 \cdot dF} - T_2 - \frac{d\dot{Q}}{\alpha_2 \cdot dF} \right) \cdot dF \quad (3.4.6)$$

Innen:

$$\frac{d\dot{Q}}{\frac{\lambda}{\delta} \cdot dF} + \frac{d\dot{Q}}{\alpha_1 \cdot dF} + \frac{d\dot{Q}}{\alpha_2 \cdot dF} = T_1 - T_2 \quad (3.4.7)$$

Tehát az átbocsátott hőmennyiség:

$$d\dot{Q} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot (T_1 - T_2) \cdot dF \quad (3.4.8)$$

$$\text{Bevezetve a } K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3.4.9)$$

$$\text{vagy az } \frac{1}{K} = R_t = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W} \text{ jelöléseket,} \quad (3.4.10)$$

a következő összefüggéseket kapjuk:

$$d\dot{Q} = K \cdot (T_1 - T_2) \cdot dF \quad (3.4.11)$$

$$d\dot{Q} = \frac{1}{R_t} \cdot (T_1 - T_2) \cdot dF \quad (3.4.12)$$

Az egész felületen áthaladó hőmennyiséget a következő összefüggés írja le:

$$\dot{Q} = K \cdot F \cdot \Delta T_a, \text{ W} \quad (3.4.13)$$

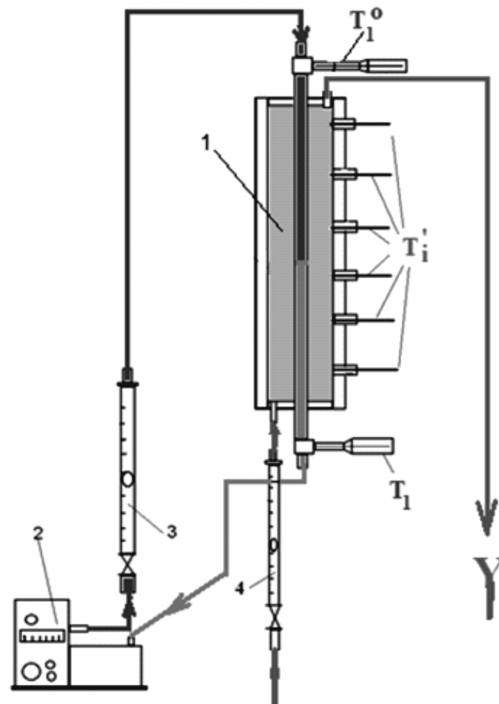
ahol:  $\dot{Q}$  – az átadott hőáram, W;  $K$  – a hőátbocsátási tényező, W/(m<sup>2</sup>·K);  $F$  – a hőcserélő felülete, m<sup>2</sup>;  $\Delta T_a$  – a közepes hőmérséklet-különbség, K.

### A gyakorlat célja:

A hőátbocsátási tényező gyakorlati meghatározása és annak összehasonlítása a számított értékkel.

### A berendezés leírása:

A 3.4.2. ábrán bemutatott gyakorlati berendezés tartalmaz egy cső a csőben típusú hőcserélőt (1), amely belső rézcsövének átmérője 15 x 1,2 mm, hossza pedig  $L = 1$  m. A külső cső átmérője 75 x 3 mm, hossza 800 mm. A hűtővizet a hálózat, míg a meleg vizet egy termosztát (2) vagy bojler szolgáltatja. A berendezéshez tartozik még két térfogatáram-mérő rotaméter (3 és 4), valamint több hőmérő ( $T_1^1$ ,  $T_1^0$ ,  $T_1$ ). A kapcsolat lehet ellenáramú (mint a 3.4.2. ábrán) vagy egyenáramú.



**3.4.2. ábra.** A gyakorlati berendezés vázlata:

1 – hőcserélő, 2 – termosztát/bojler, 3, 4 – rotaméter,  $T_1$  – hőmérők

### Mérési feladatok:

Miután a kiválasztott áramlási módban összeszereltük a berendezést, és biztosítottuk a szükséges mennyiségű és hőmérsékletű meleg vizet (a javasolt hőmérséklet 323-343 K), beállítjuk a hideg víz és a meleg víz térfogatáramát, és leolvassuk a kezdeti hőmérsékleteket. Miután a  $T_1^0$  és a  $T_1$  hőmérőkön beállt a konstans hőmérséklet (kb. 15 perc), leolvassuk azokat és a 3.4.1. táblázatban rögzítjük. Közben meghatározzuk az áramokat, és az értékeket beírjuk a táblázatba.

Ezután a csappal egy újabb értékre állítjuk a meleg víz térfogatáramát, és elvégezzük a következő mérést. A mérést más-más térfogatáramon megismételjük. A mért értékeket a 3.4.1. táblázatban rögzítjük. A méréseket elvégezhetjük a meleg víz hőmérsékletének változtatásával állandó térfogatáramot használva, vagy a hidegvíz térfogatáramát változtatva is.

## 3.4.1. táblázat. Mérési adatok

S.sz.	Térfogatáram, L/h		Meleg víz hőmérséklete, K		Hideg víz hőmérséklete a mérési pontokban				
	Meleg	Hideg	Belépő	Kilépő	1	2	3	i	n

## Számítások:

**I. A mérésre alapozott hőátbocsátási tényező ( $K_{mért}$ ) meghatározása**

Miután a méréseket elvégeztük, megrajzoljuk a hőmérséklet-lefutást, mind a meleg víz, mind a hideg víz esetén (lásd a 3.4.3. ábrát), majd kiszámítjuk az áthatott, illetve az átvett hőáramot:

$$\dot{Q}_a = V_{\tau 1} \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_1^0 - T_1) \quad (3.4.14)$$

$$\dot{Q}_v = V_{\tau 2} \cdot \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_1' - T_n') \quad (3.4.15)$$

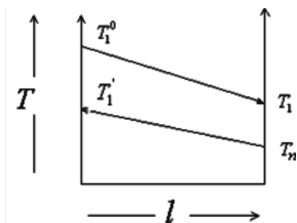
ahol:  $V_{\tau 1}$ ,  $V_{\tau 2}$  – a meleg, illetve a hűtővíz térfogatárama,  $m^3/s$ ;  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  – a fűtővíz, illetve a hűtővíz sűrűsége a közegek közepes hőmérsékletén,  $kg/m^3$ ;  $c_{p1}$ ,  $c_{p2}$  – a fűtővíz, illetve a hűtővíz fajhője a közegek közepes hőmérsékletén,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $T_1^0$ ,  $T_1$  – a meleg víz kezdeti, illetve végső hőmérséklete, K;  $T_1'$  – a hűtővíz hőmérséklete a mérési pontokban, K.

Kiszámítjuk a rézcső hőátadási felületét:

$$F = \pi \cdot d \cdot L, \text{ m}^2, \text{ ahol } d = \frac{d_k - d_b}{\ln \frac{d_k}{d_b}} \quad (3.4.16)$$

Kiszámítjuk a logaritmikus közepes hőmérséklet-különbséget:

$$\Delta T_a = \frac{(T_1^0 - T_1') - (T_1 - T_n')}{\ln \frac{T_1^0 - T_1'}{T_1 - T_n'}} \quad (3.4.17)$$



3.4.3. ábra. A mért hőmérséklet-lefutás ellenáram esetén

Kiszámítjuk a hőátbocsátási tényező értékét:

$$K_{mért} = \frac{\dot{Q}_a}{F \cdot \Delta T_a} \quad (3.4.18)$$

$$K_{m\acute{e}rt} = \frac{\dot{Q}_V}{F \cdot \Delta T_a} \quad (3.4.19)$$

Az összes mérésre elvégezzük a számításokat, az eredményeket a 3.4.2. táblázatban rögzítjük.

### 3.4.2. táblázat. Méréseken alapuló számítások

S.sz.	$V_r$ , m <sup>3</sup> /s	$w$ , m/s	Re	F, m <sup>2</sup>	$\Delta T_a$ , K	Cserélt hőmennyiség, W		Hőátbocsátási együttható, $K_{m\acute{e}rt}$	
						$\dot{Q}_a$	$\dot{Q}_V$	adott	átvett

## II. A hőátbocsátási tényező meghatározása dimenziómentes összefüggések segítségével

A hőátbocsátási tényező számítására a (3.4.20) összefüggést használjuk. Ha a cső felületén vízkőlerakódás található, akkor az előbbi összefüggés a következő formát ölti:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_{k\acute{o}}}{\lambda_{k\acute{o}}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3.4.20)$$

Vízkőlerakódás hiányában az összefüggés nevezője háromtagú összeg, mely tartalmazza a cső anyagi és a két közeg (külső és belső) anyagi és hidrodinamikai tulajdonságait. A tulajdonságokat a közegek közepes hőmérsékletén számítjuk.

A hőkonvekciós tényezők ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) számítására a 3.4.3. táblázatban feltüntetett összefüggéseket használjuk.

### 3.4.3. táblázat. Összefüggések a hőátadási tényezők számítására

Áramlás jellege	Összefüggés	Megjegyzés
Lamináris	$Nu = 3,65 + \frac{0,668 \cdot B}{1 + 0,045 \cdot B^{0,66}} \left( \frac{\eta}{\eta_{fal}} \right)^{0,14}$ $B = \frac{Re \cdot Pr \cdot d}{L}, \quad Re = \frac{\rho \cdot w \cdot d}{\eta}, \quad Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda}$	Re < 2300

Áramlás jellege	Összefüggés	Megjegyzés
Átmeneti	$Nu = 0,008 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,43}$	$Re \approx 10000$
	Grafikus módszer ajánlott	$Re \leq 10000$
Turbulens	$Nu = 0,021 \cdot \varepsilon_l \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{fal}} \right)^{0,25}$ $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}, \quad \frac{l}{d} > 50, \quad \varepsilon_l = 1$	$Re > 10000$

Forrás: Fonyó–Fábrí 2004; Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

### A számítás sorrendje:

#### Az $\alpha_1$ meghatározása:

– Kiszámítjuk a meleg közeg közepes hőmérsékletét:

$$\bar{T}_1 = \frac{T_1^0 + T_1}{2} \quad (3.4.21)$$

– Kiolvassuk a mellékletben található táblázatból a számított közepes hőmérsékleten a víz sűrűségét, viszkozitását, hővezetési tényezőjét és fajhőjét.

– Kiszámítjuk a víz sebességét:

$$w = \frac{4 \cdot V_{\tau 1}}{\pi \cdot d^2} \quad (3.4.22)$$

– Kiszámítjuk a Re és a Pr számot:

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot d_e}{\eta} \quad (3.4.23)$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \quad (3.4.24)$$

– Kiválasztjuk a 3.4.3. táblázatból az  $\alpha_1$  számításhoz szükséges megfelelő összefüggést.

– Kiszámítjuk a  $Nu$  szám értékét, és ebből az  $\alpha_1$  értékét.

#### Az $\alpha_2$ meghatározása:

– Kiszámítjuk a közepes hőmérsékletet, melynek segítségével kiolvassuk a mellékletben lévő táblázatokból a közeg sűrűségét, viszkozitását, hővezetési tényezőjét és fajhőjét:

$$\bar{T}_2 = \frac{\sum T_i}{n} \quad (3.4.25)$$

– Kiszámítjuk a hideg víz sebességét:

$$w = \frac{4 \cdot V_{\tau 2}}{\pi \cdot D_b^2 - \pi \cdot d_k^2} \quad (3.4.26)$$

– Kiszámítjuk az egyenértékű átmérőt:

$$d_e = 4 \cdot \frac{A_k}{N_k} = 4 \cdot \frac{\frac{\pi}{4} \cdot (D_b^2 - d_k^2)}{\pi \cdot (D_b + d_k)} = D_b - d_k \quad (3.4.27)$$

ahol:  $D_b$ ,  $d_k$  – a nagy átmérőjű cső (külső cső) belső átmérője, illetve a kisebb átmérőjű cső (belső cső) külső átmérője, m.

– Kiszámítjuk a Re- és a Pr-számot.

– Kiválasztjuk a megfelelő összefüggést és kiszámítjuk a  $Nu$ -számot.

– Kiszámítjuk az  $\alpha_2$  értékét:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_e} \quad (3.4.28)$$

Miután mindkét tényezőt kiszámítottuk, kiszámítjuk a hőátbocsátási tényező értékét, és az eredményeket a 3.4.4. táblázatban rögzítjük.

**3.4.4. táblázat.** Számított értékek  $\delta = \dots\dots\dots$ ,  $\lambda = \dots\dots\dots$  esetén

S.sz.	Az $\alpha_1$ számítása							
	$\bar{T}_1$	$\rho_1$	$c_{p1}$	$\eta_1$	Re	Pr	$Nu$	$\alpha_1$
	K	kg/m <sup>3</sup>	J/(kgK)	Pa·s	–	–	–	W/(m <sup>2</sup> K)

Az $\alpha_2$ számítása								
$\bar{T}_2$	$\rho_2$	$c_{p2}$	$\eta_1$	Re	Pr	$Nu$	$\alpha_1$	$K_{sz}$
K	kg/m <sup>3</sup>	J/(kgK)	Pa·s	–	–	–	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)

Összevetjük a különböző Re-számon meghatározott – mért és számított – hőátbocsátási értékeket.



### 3.5. A csőköteges hőcserélő hőátbocsátási tényezőjének gyakorlati meghatározása

Nagyobb hőátadási felület elérésére az egyik legjobb megoldás a csőköteg kialakítása, amikor a felület növelése a hosszúság csökkenésével jár. Az ilyen hőcserélőt is, akár csak a cső a csőben típusút, lehet egyen- vagy ellenáramú kapcsolással működtetni.

#### A gyakorlat célja:

A hőátbocsátási tényező meghatározása a csőköteges hőcserélő egyenáramú és ellenáramú üzemmódjában.

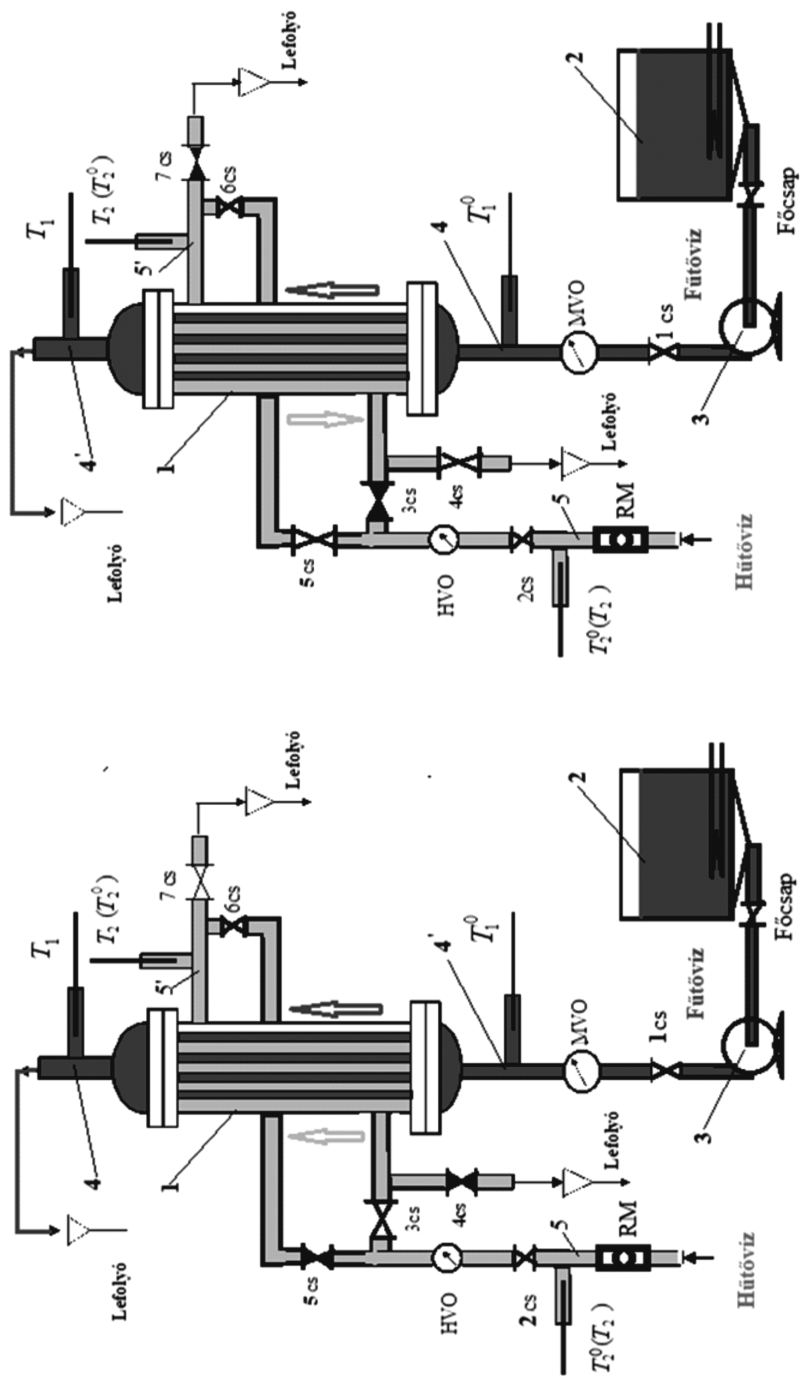
#### A berendezés leírása:

A 3.5.1. ábrán bemutatott vázlat szerint a berendezés egy  $n = 7$  darab  $d = 11 \times 1,25$  mm rézcsőből,  $90 \times 3$  mm átmérőjű acélcsőből készült csőköteges hőcserélőt tartalmaz, melynek aktív hossza  $L = 385$  mm. A be- és kilépő fluidumok (meleg víz és hideg víz) hőmérsékletének meghatározására 2-2 hőmérőt, míg a közegek térfogatáramának mérésére vízórat alkalmazunk. A kétféle áram beállítása a berendezésben lévő csapok és elosztók segítségével történik (lásd a 3.5.1a. ábrát egyenáram esetén, ellenáram esetén pedig a 3.5.1b. ábrát).

#### A mérési feladat:

A mérés elkezdése előtt ellenőrizzük a berendezés műszaki állapotát, figyelve a műszerek jelenlétére, állapotára és a csapok helyzetére. Az esetleges hibákat jelentjük a mérésvezetőnek. A hideg víz hőmérsékletének meghatározására úgy állítjuk be a csapokat, hogy a víz átfolyjon a hőmérőn, de ne kerüljön a hőcserélőbe. Miután meggyőződünk, hogy állandó a hideg víz hőmérséklete, megkezdhetjük a mérést.

Az 1. csap segítségével beállítjuk a melegvíz-áramot, és figyeljük a  $T_1^0$  hőmérőt. Amikor a hőmérséklet már nem ingadozik, akkor úgy állítjuk a csapokat, hogy a hideg víz áthaladjon a hőcserélőn. Követjük a hőmérőket, és amikor állandó értékeket figyelünk meg, vagyis beállt a stacionárius állapot, leolvassuk a hőmérsékletek értékét, és a 3.5.1. táblázatban rögzítjük. Időközben meghatározzuk a térfogatáramok értékét is, mérve az időegység alatt átfolyt vízmennyiséget. A hőmérséklet-, illetve a vízáramméréseket megismételjük még legalább kétszer, 3-5 perc idő intervallum elteltével. A számításokban a mért értékek átlagával dolgozunk.



**3.5.1. ábra. A gyakorlati berendezés vázlatja:**

1 – hőcserélő, 2 – melegvíz-tároló, 3 – örvényszivattyú, 4 és 4' – melegvíz-csonkok, 5 és 5' – hidegvíz-csonkok, 1 cs...7 cs – csapok, HVO – hidegvíz-óra, MVO – melegvíz-óra, RM – rotaméter; a. Egyenáram beállítás: főcsap, 1 cs, 2 cs, 3 cs, 5 cs, 6 cs nyitva, a többi zárva!  
 b. Ellenáram beállítás: főcsap, 1 cs, 2 cs, 4 cs, 5 cs, 6 cs nyitva, a többi zárva!

## 3.5.1. táblázat. Mérési adatok

Idő, perc	Hideg közeg hőmérséklete, °C		Meleg közeg hőmérséklete, °C		Hidegvíz- óra állás, L	Hideg- víz- áram, L/h	Meleg- vízóra állás, L	Meleg- víz- áram, L/h
	Be	Ki	Be	Ki				
Átlag- érték								

**A mérési adatok feldolgozása, számítások:**

A hőátbocsátási tényező meghatározására a következő összefüggést használjuk (Fonyó-Fábrí 2004; Stoica et alii 2007):

$$K_{mért} = \frac{\dot{Q}}{F \cdot \Delta T_a}, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3.5.1)$$

ahol:  $\dot{Q}$  – a cserélt hőáram, J/s;  $F$  – a hőátadási felület,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta T_a$  – a logaritmusos közepes hőmérséklet-különbség, K.

Első lépésben megrajzoljuk a hőmérséklet-lefutási diagramot, majd meghatározzuk a végeken mért hőmérsékleteket. A kapott értékek függvényében meghatározzuk, melyik módszert alkalmazzuk: a logaritmusos vagy a számtani átlaggal számolunk (Bratu 1984b):

$$\text{– ha } \frac{\Delta T_N}{\Delta T_k} < 2, \text{ akkor } \Delta T_a = \frac{\Delta T_N + \Delta T_k}{2} \quad (3.5.2)$$

$$\text{– ellenkező esetben } \Delta T_a = \frac{\Delta T_N - \Delta T_k}{\ln \frac{\Delta T_N}{\Delta T_k}} \quad (3.5.3)$$

A második lépésben kiszámítjuk a két közeg átlagos hőmérsékletét:

$$\bar{T}_1 = \frac{T_1^0 + T_1}{2}, \text{ K} \quad (3.5.4)$$

$$\bar{T}_2 = \frac{T_2^0 + T_2}{2}, \text{ K} \quad (3.5.5)$$

Ezek a hőmérsékletek meghatározzuk a közegek tulajdonságait: a sűrűséget és a fajhőt.

A harmadik lépésben kiszámítjuk a hőátadási felületet:

$$F = n \cdot \pi \cdot d \cdot L, \text{ m}^2 \quad (3.5.6)$$

ahol:  $d$  – a közepes átmérő, m.

A negyedik lépésben meghatározzuk a cserélt hőáramot:

$$\dot{Q}_{lead} = V_{\tau 1} \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_1^0 - T_1) \quad (3.5.7)$$

$$\dot{Q}_{felv} = V_{\tau 2} \cdot \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_2 - T_2^0) \quad (3.5.8)$$

Abban az esetben, ha a két érték közel van egymáshoz, ajánlott a felvett és a leadott hőáram átlagával számolni, vagyis:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{Q}_{lead} + \dot{Q}_{felv}}{2}, \text{ W} \quad (3.5.9)$$

Ellenkező esetben azon értékkel kell dolgozni, amelyben a mérési hiba a legkisebb. A számított értékeket a 3.5.2. táblázatban is rögzítjük.

**3.5.2. táblázat.** *Átlagolt mérési adatok*

Közeg	Mért paraméter	Üzem mód	
		Egyenáram	Ellenáram
Hideg víz	Belépő hőmérséklet, K		
	Kilépő hőmérséklet, K		
Meleg víz	Belépő hőmérséklet, K		
	Kilépő hőmérséklet, K		
Meleg áram térfogatárama	Kezdeti vízáraállás, L		
	Végso vízáraállás, L		
	Térfogatáram, L/s		
Hideg áram térfogatárama	Kezdeti vízáraállás, L		
	Végso vízáraállás, L		
	Térfogatáram, L/s		
Átlagos hőmérséklet-különbség, K			
Leadott hőáram, W			
Felvett hőáram, W			
Cserélt hőáram, W			
Hőátbocsátási tényező, W/(m <sup>2</sup> ·K)			

### 3.6. A hőátbocsátási tényező meghatározása lemezes hőcserélőben

A hőátadási felület növelését legegyszerűbben lemezes hőcserélő segítségével tudjuk elérni, ugyanis a két szorítólap közé több lemezt is beiktathatunk, és így a lemezek számával növeljük a két közeg áramlását elősegítő lemezközszámát is. Az ilyen hőcserélőt is, akár csak a csököteget, lehet egyen- vagy ellenáramú kapcsolással működtetni.

### A gyakorlat célja:

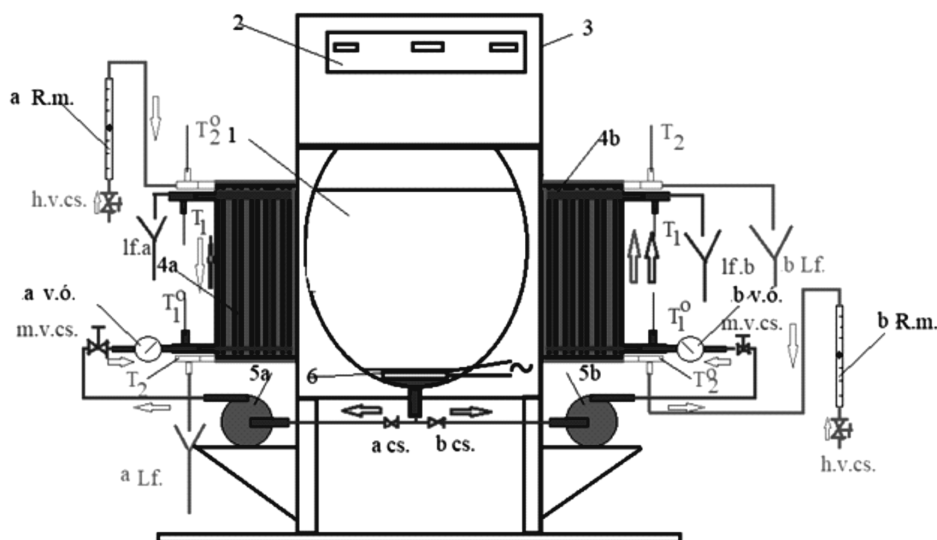
A hőátbocsátási tényező meghatározása az egyenáramú és/vagy az ellenáramú üzemmódban működő lemezes hőcserélőben.

### A berendezés leírása:

A 3.6.1. ábrán bemutatott vázlat szerint a berendezés tartalmaz egy elektromos ellenállással (6) fűthető meleg forrást (1), egy egyenáramba és egy ellenáramba beiktatott hőcserélőt (4a, 4b), egy-egy örvényszivattyút (5a, illetve 5b), melegvíz-órát (*a* v.ó. és *b* v.ó.), egy-egy rotamétert (*a* R.m. és *b* R.m.), meleg- és hidegvíz-lefolyót, illetve a hőmérsékletek meghatározására szolgáló, T-csatlakozóra szerelhető dugós csonkokat ( $T_1$ ,  $T_2$  belépő és kilépő hőmérséklet meghatározását biztosító csonkok). A hideg-, illetve a melegvíz-áram szabályozása csapok segítségével lehetséges (m.v.cs., illetve h.v.cs.). A hőmérsékletmérés adatgyűjtő beiktatásával hőelemmel történik. A meleg víz térfogatáramának meghatározása a vízóra mellett megköveteli az időmérést is, melyre kronométert használunk.

### A mérési feladat:

- Mielőtt a mérést elkezdenénk, megvizsgáljuk a berendezést, figyelve a műszerek jelenlétére, azok állapotára és a csapok helyzetére.
- Miután meggyőződünk, hogy a készülék megfelel a mérési célnak, és biztosítva van a hideg víz, bekapcsoljuk a fűtést.
- Míg a fűtés tart, lemérjük a lemezek szélességét ( $l$ ), hosszúságát ( $L$ ), falvastagságát ( $\delta$ ) és meghatározzuk azok számát ( $n$ ).
- Miután elértük a gyakorlatvezető által megszabott meleg forrás hőmérsékletét, behelyezzük a hőelemeket a csonkokba, kinyitjuk a meleg hőforrás *a* vagy *b* csapját, és megindítjuk az örvényszivattyút.
- Meghatározzuk a vízáramot, a megszabott időintervallumban leolvassva a vízóra jelzését.
- Amikor meggyőződünk az állandó vízáramról, kinyitjuk a hidegvíz-csapot, és a rotaméter előtti csappal beállítjuk a melegvíz-áramhoz közeli hidegvíz-áramra.
- Amikor ez megtörtént, bekapcsoljuk az adatgyűjtőt és a kronométert, leolvassva a melegvíz-óra kijelzőjét és a rotaméter jelzését.
- Hárompercenként elvégezzük az olvasást, és az eredményeket a 3.6.1. táblázatban rögzítjük.
- Félóra elteltével leállítjuk a rendszert, átlagértékeket számolunk, és azokat a 3.6.2. táblázatban rögzítjük.
- Ezt követően felkészülünk a másik üzembeli mérésre, feltöltve a tározót és felmelegítve a vizet.



**3.6.1. ábra.** A lemezes hőcserélő vázlatja:

1 – melegvíz-bojler, 2 – elektromos elosztó, 3 – állvány, 4a, 4b – lemezes hőcserélők, 5a, 5b – örvényszivattyúk, 6 – elektromos fűtő

### A mérési adatok feldolgozása, számítások:

A hőátbocsátási tényező meghatározására a következő összefüggést használjuk:

$$K_{\text{mért}} = \frac{\dot{Q}}{F \cdot \Delta T_a}, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3.6.1)$$

ahol:  $\dot{Q}$  – a cserélt hőáram, J/s;  $F$  – a hőátadási felület,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta T_a$  – logaritmikus közepes hőmérséklet-különbség, K.

#### 3.6.1. táblázat. Mérési adatok

Idő, perc	Hideg közeg árama, L/h	Hideg közeg hőmérséklete, °C		Meleg közeg hőmérséklete, °C		Vízóra-állás, L	Meleg víz árama, L/h
		Belépés	Kilépés	Belépés	Kilépés		
Átlag-érték							

Az első lépésben megrajzoljuk a hőmérséklet-lefutási diagramot, majd meghatározzuk a végeken mért hőmérséklet-különbségeket ( $\Delta T_N$ ,  $\Delta T_k$ ).

A kapott értékek függvényében meghatározzuk, melyik módszert alkalmazzuk: a logaritmikus vagy a számtani átlaggal számolunk.

$$- \text{ha } \frac{\Delta T_N}{\Delta T_k} < 2, \text{ akkor } \Delta T_a = \frac{\Delta T_N + \Delta T_k}{2} \quad (3.6.2)$$

$$- \text{ellenkező esetben } \Delta T_a = \frac{\Delta T_N - \Delta T_k}{\ln \frac{\Delta T_N}{\Delta T_k}} \quad (3.6.3)$$

A második lépésben kiszámítjuk a két közeg közepes hőmérsékletét:

$$T_{1a} = \frac{T_1^0 + T_1}{2}, \text{ K} \quad (3.6.4)$$

$$T_{2a} = \frac{T_2^0 + T_2}{2}, \text{ K} \quad (3.6.5)$$

Ezekon a hőmérsékleteken meghatározzuk a közegek tulajdonságait: a sűrűséget ( $\rho_1, \rho_2$ ) és a fajhőt ( $c_{p1}, c_{p2}$ ).

A harmadik lépésben kiszámítjuk a hőátadási felületet ( $F$ ):

$$F = n \cdot l \cdot L, \text{ m}^2 \quad (3.6.6)$$

ahol:  $n$  – lemezek száma;  $L, l$  – a lemez hosszúsága és szélessége, m.

A negyedik lépésben meghatározzuk a cserélt hőmennyiséget:

$$\dot{Q}_{ie} = V_{r1} \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_1^0 - T_1) \quad (3.6.7)$$

$$\dot{Q}_{fel} = V_{r2} \cdot \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_2 - T_2^0) \quad (3.6.8)$$

Abban az esetben, ha a két érték közel van egymáshoz, tanácsos a felvett és a leadott hőmennyiség átlagával számolni, vagyis:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{Q}_{ie} + \dot{Q}_{fel}}{2}, \text{ W} \quad (3.6.9)$$

Ellenkező esetben tanácsos azon értékkel dolgozni, amelyben a mérési hiba a legkisebb.

Utolsó lépésben kiszámítjuk a  $K$  hőátbocsátási tényező értékét, és a 3.6.2. táblázat megfelelő cellájában rögzítjük.

### 3.6.2. táblázat. Számított adatok

Közeg	Átlagolt mérési értékek	Üzem mód	
		Egyenáram	Ellenáram
Hideg víz	Belépő hőmérséklet, K		
	Kilépő hőmérséklet, K		
Meleg víz	Belépő hőmérséklet, K		
	Kilépő hőmérséklet, K		
Meleg víz térfogatárama	A víz mért térfogata, L		
	Eltelt idő, s		
	Térfogatáram, L/s		

Közeg	Átlagolt mérési értékek	Üzem mód	
		Egyenáram	Ellenáram
<b>Hideg víz térfogatárama</b>	Térfogatáram, L/s		
Átlagos hőmérséklet-különbség, K			
Leadott hőáram, W			
Felvett hőáram, W			
Cserélt hőáram, W			
Hőátbocsátási tényező, $W/(m^2 \cdot K)$			

Miután elvégeztük a méréseket és a számításokat mind az egyenáramra, mind az ellenáramra, ne feledjük a kapott adatokat röviden értékelni!



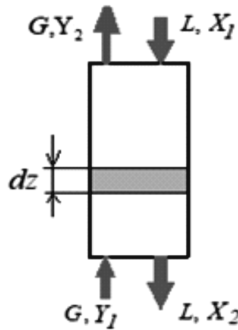


# KOMPONENSÁTADÁSI MŰVELETEK

## 3.7. Az abszorpció vizsgálata töltött oszlopú kolonnában

Az abszorpció során az oldódó gázkomponens áthatol a gáz-folyadék határfelületen és a folyadékba oldódik. Az átvitelt megelőzi a gázfázisbeli transzport, és követi a folyadékfilmben fellépő diffúziós folyamat. Az abszorpció annál intenzívebb, minél nagyobb a két fázis közötti határfelület. Ennek növelésére egyik legkézenfekvőbb módszer a töltetes/töltött oszlopú kolonna. Ilyen abszorpciós kolonnával találkozunk mind a vegyipar területén (kénsavgyártás, kénessavgyártás), mind az energetikában (gázmosás) vagy a környezetiparban (füstgáztisztítás).

A 3.7.1. ábrán az ellenáramú abszorber elvi rajza látható. A  $G$  inert móláramú és  $Y_1$  koncentrációjú gáz belép az oszlopba, és azt elhagyja a  $G$  móláramú és  $Y_2$  koncentrációjú gáz. A szolvens belépő és kilépő mólárama  $L$ , koncentrációja pedig  $X_1$ , illetve  $X_2$ . A töltetes oszlop elemi térfogatú ( $dV = S \cdot dz = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot dz$ ) oszloprészen a gázfázis lead  $G \cdot dY$  mennyiséget, míg a folyadékfázis felvesz  $L \cdot dX$  mennyiséget.



3.7.1. ábra. Az ellenáramú abszorpció bloksémája

A komponensmegmaradás elveinek érvényesülése miatt felírható, hogy a cserélt komponensáram:

$$d\dot{N}_A = G \cdot dY = L \cdot dX \quad (3.7.1)$$

Ezt az összefüggést a *munkavonal egyenletének* is nevezik (Fonyó-Fábri 2004).

Integrálva a kezdeti ( $X_1$ ,  $Y_1$ ), illetve a pillanatnyi ( $x$ ,  $y$ ) értékek közt:

$$\int_{Y_1}^Y G \cdot dY = \int_{X_1}^X L \cdot dX \Rightarrow G \cdot (Y - Y_1) = L \cdot (X - X_1) \quad (3.7.2)$$

Ezt még felírhatjuk:

$$Y = Y_1 + \frac{L}{G} X - \frac{L}{G} X_1 \quad (3.7.3)$$

Amint látható, ha  $G$  és  $L$  állandó, az  $Y$ - $X$  koordináta-rendszerben a munkavonal egy egyenesnek felel meg, melynek meredeksége az  $L/G$  arány.

Kifejezve a gázfázisból a folyadékfázisba átvitt komponens mennyiségét, következnek:

$$\dot{N}_A = G \cdot dY = K_g \cdot a \cdot \left( \frac{\pi D^2}{4} dz \right) \cdot \Delta Y \quad (3.7.4)$$

ahol:  $K_g$  – a gázfázisban fellépő komponensátbocsátási tényező, kmol/s·m<sup>2</sup>;  
 $a$  – a töltet fajlagos felülete, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>;  $\frac{\pi \cdot D^2}{4} dz$  – az átadásban részt vevő elemi oszloprész térfogata, m<sup>3</sup>;  $\Delta Y$  – az átviteli folyamat hajtóereje.

Átrendezve a (3.7.4) összefüggést és integrálva, következnek:

$$\int_{Y_1}^Y \frac{dY}{\Delta Y} = \frac{K_g \cdot a \cdot \pi D^2}{G \cdot 4} \cdot \int_0^Z dz \quad (3.7.5)$$

vagyis:

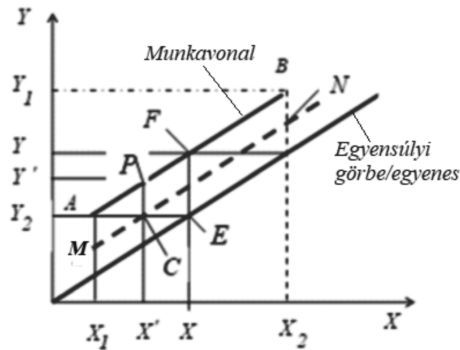
$$Z = \frac{4G}{\pi D^2} \cdot \frac{1}{a \cdot K_g} \cdot \int_{Y_1}^Y \frac{dY}{\Delta Y} \quad (3.7.6)$$

Az összefüggés integráljának értéke megfelel az átviteli egység számnak ( $NTU$ ), míg a  $\frac{4G}{\pi D^2} \cdot \frac{1}{a \cdot K_g}$  tört megfelel az átviteli egységmagasságnak ( $HTU$ ), tehát felírható:  $Z = NTU \cdot HTU$  (3.7.7)

Ahhoz, hogy az átviteli tényezőt meghatározhassuk egy  $Z$  ismert magasságú töltetes oszlop esetében, szükséges az átviteli egység szám és az átviteli egységmagasság meghatározása. Az átviteli egység szám meghatározására a legkézenfekvőbb a Baker-féle grafikus módszer (lásd a 3.7.2. ábrát). Ezt akkor alkalmazhatjuk, amikor az  $Y$ - $X$  egyensúlyi összefüggés és a munkavonal lineárisak (Fonyó-Fábri 2004). Az  $AB$  munkavonal és az egyensúlyi görbe közötti zónába berajzoljuk az  $MN$  segédvonalat oly módon, hogy a két vonal közötti részt megfelezzük. A szerkesztésnél az  $A$  pontból kiindulva vízszintes irányba egyenest rajzolunk, majd az  $AE$  szakaszt felezve megkapjuk a  $C$  pontot.

Az  $E$  pontból függőlegest húzva a munkavonalig megkapjuk az  $F$  pontot. A töltött oszlopnak az  $AEF$  háromszöggel jellemzett szakaszán a létrejövő koncentrációváltozás megegyezik az átlagos hajtóerővel. Tehát az oszlop e szakasza egy átviteli egységnek felel meg. Az  $AB$  szakasz végpontjai között megrajzolt háromszögek száma az átviteli egységek száma. Ekképp meghatározott átviteli egység számok után kiszámítható az átviteli egységmagasság:

$$HTU = Z / NTU \quad (3.7.8)$$



3.7.2. ábra. A Baker-módszer (Fonyó-Fábrí 2004)

Az átviteli egységmagasság alapján, amely egy adott geometriájú kolonna esetében a nedvesített töltet fajfelülete és az átbocsátási tényezőtől függ, kiszámítjuk az anyagátadási tényezőt:

$$K_g = \frac{4G}{\pi D^2 a} \cdot \frac{1}{HTU} \quad (3.7.9)$$

ahol: a fajlagos nedvesített átadási felületet ( $a$ ) a geometriai felülettel számítjuk ki (Szolcsányi-Szánya 1998):

$$a = a_{geom} \cdot \left( \frac{j_L}{j_g} \right)^{0,337} \cdot \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0,187} \cdot \left( \frac{\eta_L}{\eta_g} \right)^{0,0375} \quad (3.7.10)$$

amelyben:  $j_L$ ,  $j_g$  – a folyadék, illetve a gáz tömegáram-sűrűsége,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\rho_L$ ,  $\rho_g$  – a folyadék, illetve a gáz sűrűsége,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\eta_L$ ,  $\eta_g$  – a folyadék, illetve a gáz viszkozitása,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ .

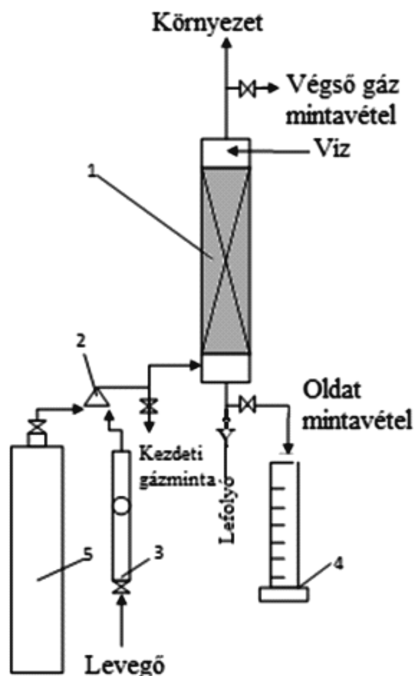
### A gyakorlat célja:

- a töltött oszlopú berendezés ismertetése és működésének elsajátítása,
- a teljes anyagmérleg és komponensmérleg felállítása,
- az átbocsátási tényező meghatározása mérések alapján.

### A gyakorlati berendezés:

A 3.7.3. ábrán bemutatott berendezés az üvegyűrűkkel töltött kolonnán (1), rotaméteren (3) és gázkeverőn (2) kívül tartalmaz egy szén-dioxid-palackot (5), mérőhengert (4) és üvegfalakokat.

A levegő és a szén-dioxid-keverék vagy csak a szén-dioxid a kolonna alsó csonkján lép be, és a felső csonkon hagyja el az oszlopot. A vizet az oszlop tetején adagoljuk és az alján vezetjük el. Az abszorbens térfogatáramát köbözéssel határozzuk meg.



**3.7.3. ábra.** A gyakorlati berendezés vázlatja:

1 – töltetes kolonna ( $d=60 \times 5 \text{ mm}$ ,  $Z = 330 \text{ mm}$ ), 2 – keverő, 3 – rotaméter (lebegőtestes áramlásmérő), 4 – mérőhenger, 5 – gázpalack

### A mérési feladat:

*A folyadékminta elemzése:*

A folyadék szén-dioxid-tartalmát NaOH-oldat segítségével határozzuk meg. Minden 30 mL térfogatú 0,1 M NaOH-oldatba adagolunk 50 mL próbát, és az oldatot visszatitráljuk fenolftalein jelenlétében 0,1 M HCl-oldattal.

Az oldat szén-dioxid-tartalmát a (3.7.11) összefüggéssel számítjuk ki:

$$C_{CO_2} = \frac{(V_{NaOH} - n' \cdot V_{HCl}) \cdot T_{NaOH}}{E_{NaOH}} \cdot \frac{E_{CO_2}}{M_{CO_2}} \cdot \frac{1000}{V_p}, \text{ mol/L} \quad (3.7.11)$$

ahol:  $V_{NaOH}$ ,  $V_{HCl}$  – a hidroxid-, illetve a sósavoldat térfogata, mL;  $E_{NaOH}$ ,  $E_{CO_2}$  – a hidroxid-, illetve a szén-dioxid egyenértékű tömege, g/eqv.;  $T_{NaOH}$  – a hidroxidoldat koncentrációja, g/mL;  $M_{CO_2}$  – a szén-dioxid móltömege, g/mol;  $V_p$  – a használt minta térfogata, mL;  $n'$  – az 1 mL sósav semlegesítéséhez szükséges nátrium-hidroxid-oldat, mL/mL.

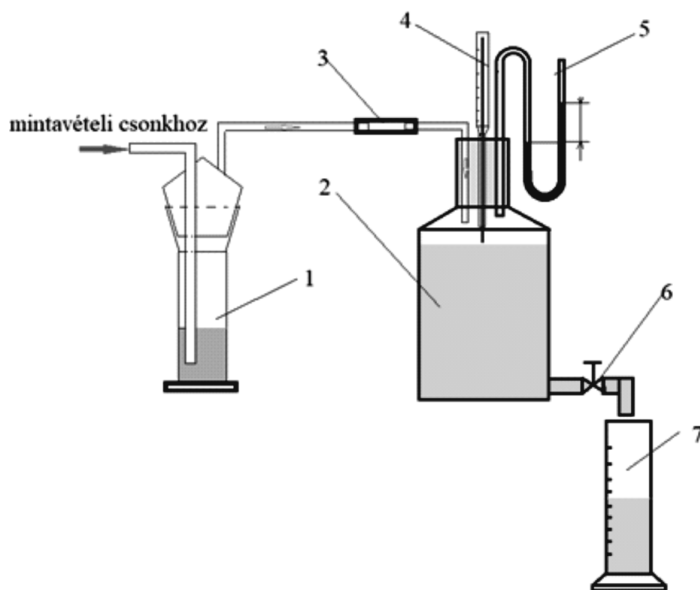
*A gázminta elemzése:*

Gázmintát vehetünk vákuumos lombikkal vagy a Reich-módszer alkalmazásával. Az első esetben, miután betöltöttünk a lombikba 20 mL 0,1 M NaOH-oldatot, vákuum alá helyezzük, és kiszívjuk a levegőt. Majd lemérjük a lombikot, meghatározva az  $m_0$  tömeget. Azután a lombikot a mintavevő csonkhoz csatlakoztatjuk, és megnyitva a lombik szelepét, mintát veszünk. Újra lemérjük a lombikot, meghatározva az  $m$  értékét, és egyúttal a minta tömegét is. A lemerített lombikot jól összerázzuk, majd a dugót eltávolítva 0,1 M HCl-oldattal fenolftalein jelenlétében visszatitráljuk a fölöslegben maradt hidroxidot.

A szén-dioxid-koncentrációt a következő összefüggések segítségével számítjuk:

$$x_{CO_2} = \frac{(V_{NaOH} - n \cdot V_{HCl}) \cdot T_{NaOH}}{E_{NaOH}} \cdot \frac{E_{CO_2}}{m - m_0}, \text{ g/g} \quad (3.7.12)$$

$$y_{CO_2} = \frac{\frac{x_{CO_2}}{M_{CO_2}}}{\frac{1 - x_{CO_2}}{M_{levegő}} + \frac{x_{CO_2}}{M_{CO_2}}}, \text{ mol/mol} \quad (3.7.13)$$



**3.7.4. ábra.** Gázmintavétel Reich-módszerrel:

- 1 – gázmosó edény, 2 – oldalcsonkkal ellátott üveg- vagy műanyag edény,  
 3 – rugalmas csatlakozás, 4 – hőmérő, 5 – U-csöves manométer, 6 – csap,  
 7 – mérőhenger az inert gáz térfogatméréséhez (Tudose et alii 2001)

A Reich-módszer esetén (lásd a 3.7.4. ábrát) először a mintát átvezetjük egy mosóedényen, amelyben 0,1 M NaOH-oldat található. Az oldatban nem oldódó inert komponens kiszorítja a mérőedényből a térfogatának megfelelő vizet. Az oldódott szén-dioxidot visszatitrálással határozzuk meg. A mérés előtt feltöltjük vízzel a levegőmérésre szükséges manométerrel és hőmérővel ellátott mérőedényt, azután a gázmosóba beletöltünk 20 mL 0,1 M NaOH-oldatot és néhány csepp fenoltaleint. A gázmosót a mintavevő csonkhoz csatlakoztatjuk, és a mérőhengert a vízzel töltött edény kivezető csonkjához helyezzük.

Megengedjük a vizet, és miután egy kis vákuum keletkezett, lassan megkezdjük a gázmintavételt. Amikor az indikátor színe halványodni kezd, elzárjuk a vízcsapot, és addig engedjük a gázt, míg a manométer ki nem egyensúlyozódik. Azután leolvassuk a kivett víz térfogatát ( $V_L$ ), hőmérsékletét ( $T$ ) és a légköri nyomást ( $p_b$ ). A gázmosót jól összerázzuk, a dugót kiemeljük és jól megmossuk, a nátrium-hidroxidot visszatitráljuk 0,1 M sósavval. A mért adatok segítségével kiszámítjuk a gáz szén-dioxid-tartalmát:

$$y_{CO_2} = \frac{1}{V_L \cdot \frac{p_b - p_{H_2O}^{(T)}}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} + (V_{NaOH} - n \cdot V_{HCl}) \cdot T_{NaOH} \cdot \frac{V_M}{E_{NaOH}}}, \text{ mol/mol} \quad (3.7.14)$$

ahol:  $p_{H_2O}^{(T)}$  – a mért hőmérsékletnek megfelelő vízgőznyomás, Pa;  $T_0, p_0$  – a normál hőmérséklet és nyomás, K, illetve Pa;  $V_M$  – a gáz móltérfogata, m<sup>3</sup>/mol.

*Az áramok meghatározása:* A gáz térfogatáramának a meghatározására a táblázatban feltüntetett rotaméterrel mért levegőáramot vesszük alapul, míg a folyadék térfogatáramának meghatározására a köbözési módszerrel mért adatokat.

**3.7.1. táblázat.** *Mérési adatok*

Mérések száma	1	2	3	4	Átlag
<b>Levegő térfogatárama, L/h</b>					
<b>Gázkeverék koncentrációja, mol CO<sub>2</sub>/mol keverék</b>	<b>Belépés</b>				
	<b>Kilépés</b>				
<b>Folyadék (víz) térfogata, mL</b>					
<b>Gyújtási idő, s</b>					
<b>Folyadék (víz) térfogatárama, L/h</b>					
<b>Kilépő folyadék koncentrációja, C<sub>CO<sub>2</sub></sub>, mol/L</b>					

**A mérési adatok feldolgozása:**

– Meghatározzuk a belépő inert gáz (levegő) és folyadék (víz) móláramát:

$$G = \frac{V_{\tau\text{levegő}}}{V_{\text{moláris}}}, \text{ mol/h} \quad (3.7.15a)$$

$$L = \frac{V_{\tau\text{víz}}}{\rho_{\text{víz}} \cdot M_{\text{víz}}}, \text{ mol/h} \quad (3.7.15b)$$

ahol:  $V_{\tau\text{levegő}}$  – a levegő mért átlagos térfogatárama, L/h;  $V_{\text{moláris}}$  – a mérési körülményeken számított móltérfogat, L/mol;  $V_{\tau\text{víz}}$  – a víz térfogatárama, L/h;  $\rho_{\text{víz}}$  – a víz sűrűsége a mérési körülményeken, g/L;  $M_{\text{víz}}$  – a víz móltömege, g/mol.

– Kiszámítjuk a belépő gáz és a folyadék, illetve a kilépő gáz és a folyadék szén-dioxid-koncentrációját mólarányban:

$$Y = \frac{y}{1-y} \text{ a belépő és a kilépő gázra} \quad (3.7.16)$$

$$X = \frac{C_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{víz}}} \cdot M_{\text{víz}} \text{ a kilépő folyadékra, a belépésre } X^0=0. \quad (3.7.17)$$

– A mérési adatok segítségével fölállítjuk a mérleget (3.7.2. táblázat).

**3.7.2. táblázat. A folyamat anyagmérlege**

Áram	Belépés			Kilépés		
	Komponens	$n^o$ , mol/h	$x^o$	Komponens	$n$ , mol/h	$x$
Gáz	CO <sub>2</sub>					
	Levegő					
	Összesen					
Folyadék	CO <sub>2</sub>					
	Víz					
	Összesen					
Mindösszesen						

– A melléklet segítségével megrajzoljuk az egyensúlyi görbét.  
 – A mérési adatok segítségével megrajzoljuk a munkavonalat.  
 – A Baker-módszerrel meghatározzuk az átviteli egységszámot.  
 – A (3.7.10) összefüggés segítségével meghatározzuk, a mért hőmérsékleten vett víz tulajdonságainak felhasználásával, a fajlagos átadási felület értékét. Először meghatározzuk egy gyűrű fajlagos felületét, majd meghatározzuk (megszámoljuk), hogy hány gyűrű fér bele 200 mL töltetbe, és aztán kiszámítjuk az 1 m<sup>3</sup> töltetre vonatkoztatott felületet.

– Megmérjük a kolonna töltetmagasságát.

– A (3.7.8) összefüggés felhasználásával kiszámítjuk az átviteli egység magasságát és a (3.7.9) segítségével az átbocsátási tényező értékét.



### 3.8. A szakaszos szabad konvekciós és hősugárzású szárítás kinetikai vizsgálata

A szárítás mint művelet nagyon sok technológiai folyamatban megtalálható. Általában a nedvesség csökkentése vagy eltávolítása hőenergia segítségével megy végbe. Ezért a nedves anyagot, mely lehet egyedi vagy szemcsehalmaz, valamilyen módon melegítik. A melegítés lehet közvetett vagy közvetlen. Az első esetben általában gőzzel előre melegített levegőt vagy más gázt (lehet az égési gáz is) alkalmaznak, míg a második esetben legtöbbször elektromos áram segítségével valósítják meg a fűtést. Bármilyen módon is végzik a melegítést, a nedvesség eltávolítása megköveteli annak cseppfolyós (adszorbeált/megkötött) állapotból a gőzfázisba való átalakulását és a gőzök diffúzióját a környezetbe.

Ha egy nedves szemcsehalmaz szárítását végezzük, a nedvesség eltávolítását mindig megelőzi a hőtranszport. Az áramló hőhordozó hiányában a hő a meleg falról a nedves szemcsehalmazt körülvevő gázon keresztül, konvekciós és sugárzási mechanizmussal halad a felület felé, melyet felmelegít, elősegítve a nedvesség gőzfázisba történő átalakulását. Tehát a felületi nedvesség gőzzé alakul, és a külső diffúzió után a környező gázzal keveredve, természetes áramlás hatására elhagyja a szárítandó anyagot. A felületi nedvesség fogytával az anyag belsejében lévő folyadék kapilláris transzporttal halad a felület felé, ahol gőzzé alakul, és külső diffúzióval elhagyja az anyag környezetét. Ez a folyamat mindaddig fennáll, amíg az anyag belsejében elég sok nedvesség található. Amikor a nedves anyag már nem képes táplálni a felületet cseppfolyós nedvességgel, akkor a felület közvetlen közelében kialakul egy száraz zóna, mely – haladva az anyag központja felé – idővel egyre nagyobb és nagyobb lesz. Ebben az esetben a cseppfolyós nedvesség már nem halad kapilláris transzporttal a külső felület felé, hanem a külső felülettel párhuzamos felületen gőzfázissá alakul, és fellép a gőz belső diffúziós folyamata. Míg a külső, felületi nedvesség eltávolításakor az anyag hőmérséklete nem lépi túl a nedvesség forráspontját, addig a belső nedvesség eltávolításakor a szárazabb szilárd anyag hőmérséklete egyre nagyobb lesz, és fellép egy elég nagy hőmérséklet-különbség a külső és belső felület között. Ez a különbség a hőtranszport hajtóereje.

Míg a felületi nedvesség eltávolítási sebessége függ a kapott hőmennyiségtől és a hidrodinamikai körülményektől, addig a belső nedvesség eltávolítása függ az anyag porozitásától, szemcseméretétől és egyedi anyagoknál a mérettől is. Az első fázisban a szárítást a külső diffúzió, míg a második fázisban a belső diffúzió határozza meg.

#### A szárítási görbék

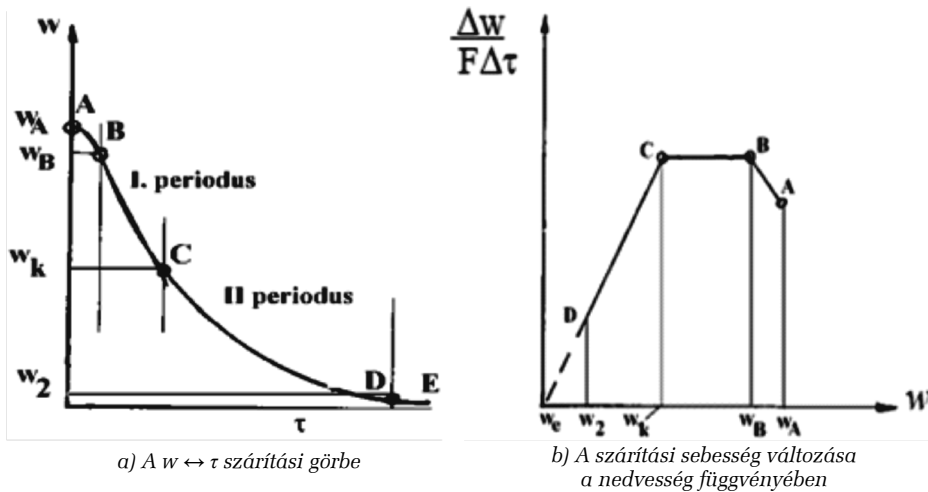
A nedvesség időbeli változásának ábrázolása adja meg a szárítás egyik ismert görbéjét (lásd a 3.8.1a. ábrát). E görbe segítségével megrajzolható a szárítási

sebesség (a nedvességtartalom időben és egységnyi felületre számított változása:  $\frac{\Delta w}{F \cdot \Delta \tau}$ ) a nedvesség függvényében (lásd a 3.8.1b. ábrát). Amint a görbékből is jól

látható, két különböző szárítási periódus létezik:

- az első, az ún. állandó sebességű szárítás, a BC egyenesnek megfelelően, illetve
- a második, csökkenő sebességű szárítási periódus, amely a CD egyenesnek megfelelő.

A C pontnak megfelelő nedvesség a *kritikus nedvesség* néven ismert. Az első periódusban a nedvesség lineárisan csökken, míg a másodikban egyre kisebb lesz, ahogy az anyag nedvessége fogy és eléri az E pont környékén a nullához közel lévő értéket. Az AB nem izoterm szakasz megfelel az anyag melegítésének. Az E pont nedvességét *egyensúlyi nedvesség*nek is nevezzük.



**3.8.1. ábra.** Szárítási görbék (Fonyó-Fábrí 2004)

A szárítás időtartamát a következő összefüggés írja le (Fonyó-Fábrí 2004):

$$\tau = \frac{m}{F \cdot k} \cdot \left( \frac{w_1 - w_{kr}}{w_{kr} - w_e} + \ln \frac{w_{kr} - w_e}{w_2 - w_e} \right), \text{ s} \quad (3.8.1)$$

ahol:  $m$  – a szárítandó anyag tömege a nedvességmentes anyagra számítva, g;  $F$  – a szárítási felület,  $\text{m}^2$ ;  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_{kr}$ ,  $w_e$  – a kezdeti, a végső, a kritikus, illetve az egyensúlyi nedvességtartalom,  $\text{kg}/\text{kg}$  száraz anyag;  $k$  – a szárítási sebesség együtthatója,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .

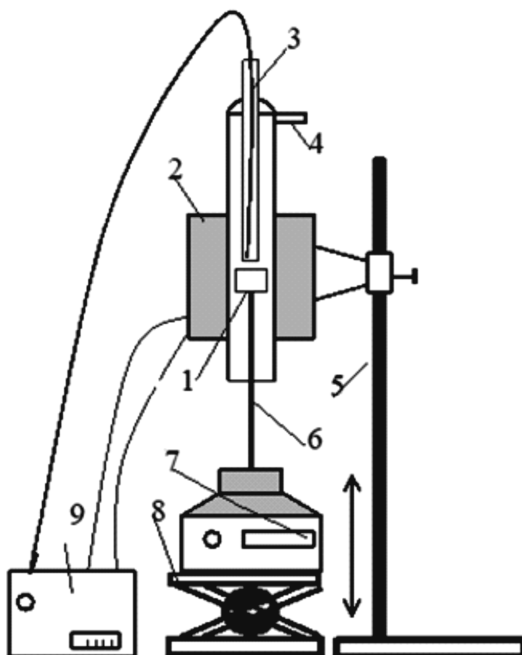
### 3.8.1. A szabad konvekciós szárítás

#### A gyakorlat célja:

A szárítási sebesség együtthatójának meghatározása a mérési görbék segítségével.

#### A gyakorlati berendezés:

A 3.8.2. ábrán bemutatott gyakorlati berendezés egy kéttizedes pontosságú mérlegre (7) szerelt tégelyt (1) és egy hőszabályzóval (9) ellátott csőkemencét (2) tartalmaz. A kemencébe szerelt kvarccső szabad csonkján (4) lehet eltávolítani a gőzzel telítődött levegőt. Ugyancsak a csőbe szerelt termoelem (3) segítségével lehet bemérni a kemence központjában lévő hőmérsékletet. Miután elértük a megszabott hőmérsékletet, a csavarmentes emelő (8) segítségével felemeljük, és a kemencébe juttatjuk a tégelybe (1) helyezett mintát. Megindítva a kronométert elkezdjük a mérést, azaz időben követjük a minta tömegének a változását. A mért adatokat a 3.8.1. táblázatban rögzítjük.



**3.8.2 ábra.** A gyakorlati szárítóberendezés:

1 – tégely (mintatartó), 2 – fűtőkemence, 3 – hőelem, 4 – csonk, 5 – állvány,  
6 – tégelytartó rúd, 7 – digitális mérleg, 8 – csavarmentes emelő, 9 – hőszabályzó egység

**3.8.1. táblázat. Mérési adatok**

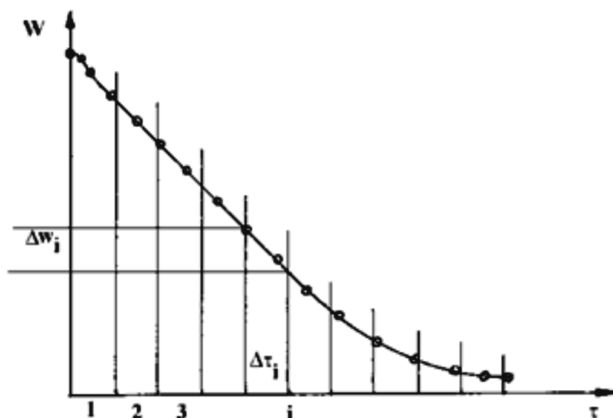
Idő, s							
m, g							
w, kg/kg							

**Az adatok feldolgozása, számítások:**

A mérési adatok segítségével megrajzoljuk a  $w \leftrightarrow \tau$  szárítási görbét (lásd a 3.8.3. ábrát). A megrajzolt görbén egyenlő  $\Delta\tau$  intervallumokat mérünk, és leolvassuk az annak megfelelő  $\Delta w$  értékeket. A leolvasott adatokat a 3.8.2. táblázatban rögzítjük. Az adatok segítségével megrajzoljuk a szárítási sebesség – nedvesség görbét ( $\frac{\Delta w}{F \cdot \Delta\tau} \leftrightarrow w$ ), meghatározzuk annak egyenletét és a szárítási paramétereit ( $w_1, w_2, w_{kr}, w_e$ ), melyek ismeretében a (3.8.1) összefüggés segítségével kiszámítható a szárítási sebesség együtthatója.

**3.8.2. táblázat. Számított értékek  $F = \dots m^2$  felületen történt szárítás esetén**

Sorszám							
$\tau$ , s							
w, kg/kg							
$\Delta\tau$							
$\Delta w$							
$\frac{\Delta w}{F \cdot \Delta\tau}$							

**3.8.3. ábra.** Gyakorlati szárítási görbe

### 3.8.2. A hőszugárzású szárítás

#### A gyakorlat célja:

Megszerkeszteni adott méretű és állagú anyag állandó hőmérsékleten történő szárításának görbéit (a 3.8.1. ábrának megfelelő koordináta-rendszerben), majd ezekből megbecsülni a szárítási sebességet és meghatározni a kinetikai modellt.

#### A készülék ismertetése:

A mérések elvégzésére egy KERN MLB MB 10 típusú 400 W higanygőzös lámpával ellátott készüléket alkalmazunk, melynek képe és vázlata a 3.8.4a. és 3.8.4b. ábrákon van feltüntetve. A készülék tartalmaz egy háromtizedes pontosságú digitális mérleget, mely alkalmas megszabott hőmérsékleten (izoterm körülményeken) maximum 50 g nedves anyag szárítására, változó időtartamot alkalmazva.

#### A munkamenet leírása:

##### *A minta előkészítése*

Szárítási minták esetében fontos ismerni a teljes és a levegővel közvetlen kapcsolatban lévő felületet. Egyedi, szabályos geometriával rendelkező anyagok esetében ezt méréssel határozzuk meg, míg ömlesztett anyagoknál kell ismerni a részecskék méretét, alakját, alak tényezőjét, a réteg hézaghányadosát és annak vastagságát. Szemcsés anyagok esetében (mint például a gabona) szükséges ismerni a részecskék (szemek) átlagos méretét ( $L \times l \times d$  méreteket) és az egy rétegben elhelyezett részecskék (szemek) számát. Ebben az esetben mikrométerrel történő méréseket vagy vetületméréseket végzünk. Erre alkalmas még a mikrométeres mikroszkóp-asztali méréstechnika is.

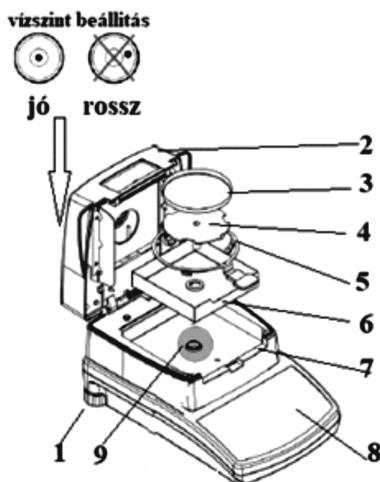
##### *A készülék megszabott paraméterre történő beállítása*

A mérési paraméterek beállítása a mérleg különböző gombjaival lehetséges, a változtatásokat pedig az LCD kijelzőn követhetjük (lásd a 3.8.5. ábrát). A szárítási paraméterek beállítása a bekapcsolás utáni néhány lépés elvégzését feltételezi, melyek sorrendjét a következő példán mutatjuk be.

**PÉLDA:** Alkalmazva a termomérleget vegyük fel egy  $1 \times 1 \times 1$  cm méretű, kocka alakra formázott nyerstészta  $80\text{ °C}$  hőmérsékleten megvalósított szárítási görbéjét, a nedvesség időbeli változása formájában.



**3.8.4a. ábra.** A mérleg képe

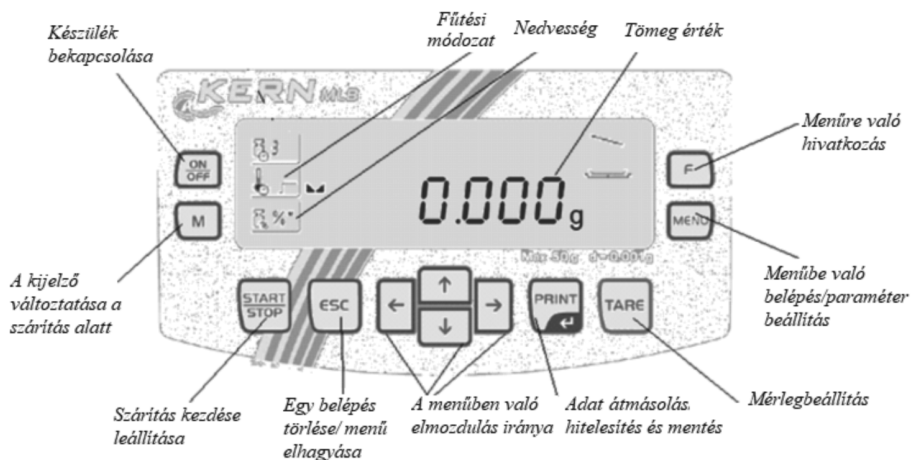


**3.8.4b. ábra.** A mérleg vázlatja:

- 1 – vízszintre állító csavar, 2 – fedő,  
 3 – mintatartó tálca, 4 – mintatartó  
 állvány, 5 – mintatartó eltávolítására  
 szolgáló keret, 6 – szélvédő (porképződés-  
 gátló), 7 – porvédő alaplemez,  
 8 – LCD kijelző, 9 – rúd

**Tömegmérési intervallum beállítása:**

- A menügombbal kiválasztjuk az LCD kijelző bal oldalán látható felső ikont.
- A balra mutató nyíl segítségével beállítjuk a mérési intervallumot (figyelembe véve a 3.8.3. táblázat javasolt adatait), vagy a jelzőt az óra ikonra visszük. Itt megadhatjuk a szárítási intervallumot (1 perctől 9 óra 59 percig).
- Háromszor megnyomva a „Mentés” gombot lementjük a paramétereket.



**3.8.5. ábra.** A készülék kijelzőjén található gombok és azok jelentése

#### **Hőmérséklet beállítása:**

- A menügombbal kiválasztjuk a fűtési módot jelképező ikont (középsőt).
- A nyilak segítségével beállítjuk a fűtési profilt.
- A nyilakkal beállítjuk a megszabott hőmérsékletet.
- Kétszer megnyomva a „Mentés” gombot lementjük a paramétereket.

#### **Beállítjuk az adatmegjelenítést:**

- A menügombbal kiválasztjuk a % nedvesség ikont (alsót).
- A nyilak segítségével kiválasztjuk az adatmegjelenítést (% nedvesség, % szárazanyag, szárazanyagra vonatkoztatott nedvesség, maradék tömeg).
- Kétszer megnyomva a „Mentés” gombot lementjük a paramétereket.

**3.8.3. táblázat.** Különböző anyagok nedvességtartalmának meghatározására javasolt beállítási paraméterek

Anyag	Bemérendő mennyiség, g	Szárítási hőmérséklet, °C	Szárítási idő, min	Nedvesség, w, %	Leolvasási intervallum, s
Papír	2–4	106	10,0	6,4	20
Liszt	8–10	130	4–5	12,5	10
Cukor	4–5	138	10,0	11,9	15
Tejpor	2–4	90	6,0	5,0	15
Kakaópor	2–3	106	2,0	0,1	20
Joghurt	2–3	110	4,5–6,5	86,5	15

Anyag	Bemérendő mennyiség, g	Szárítási hőmérséklet, °C	Szárítási idő, min	Nedvesség, w, %	Leolvasási intervallum, s
Őrölt kávé	2–3	106	4,0	2,8	5
Alma	5–8	100	5–10	76,5	10
Aszalt alma	5–8	100	10–15	7,5	10
Kukorica-pehely	2–4	120	5–7	9,5	15
Vaj	2–5	138	4,5	16,3	15
Bor	3–5	100	15–20	97,4	15

Forrás: Kern termomérleg használati útmutató

### Mérés

- Megnyomjuk a „Start/Stop” szárítás kezdését jelző gombot.
- Ráhelyezzük a mintatartó tálcát (3).
- Lenullázzuk a tálcát megnyomva a „Tare” gombot.
- A tálcára helyezzük a mérendő anyagot/mintát.
- A bemért tömeget lejegyezzük.
- Lecsukjuk a fedőt, és automatikusan elindul a szárítási folyamat.
- Félpercenként bevezetjük a 3.8.4. táblázatba a beállított adatokat, a szárítási időt és a hőmérsékletet. Ha érdekel a szárítás alatti más adatmegjelenítés, akkor az M gomb megnyomásával a kijelző átvált.

– A szárítási idő leteltével a készülék hangjelzést ad, a fűtés kikapcsol, a végző adat mindaddig megjelenik az LCD kijelzőn, amíg kinyitjuk a fedőt. **Vigyázat, a fedő forró!**

### Az adatok feldolgozása:

A mért adatok segítségével kiszámítjuk a szárítási sebességek értékét, és azokat a 3.8.4. táblázatban rögzítjük. Ezt követően megrajzoljuk a nedvesség ↔ idő és a szárítási sebesség ↔ nedvesség görbéket (lásd a 3.8.1a. vagy a 3.8.3. ábrát, illetve a 3.8.1b. ábrát), a görbék segítségével meghatározzuk a szárítási paramétereket és kiszámítjuk a  $k$  szárítási sebesség együtthatót.



**3.8.4. táblázat.** A felvett mérési és számítási adatok az  $F = \dots\dots m^2$  felületű  $\dots\dots$  anyag szárításánál

Kezdeti tömeg: .....			
Idő, s	Hőmérséklet, °C	Szárítási adat, w, %	$\frac{\Delta w}{F \cdot \Delta \tau}$

### 3.9. A komponensszétválasztás tanulmányozása egyszerű szakaszos desztillációs berendezésben

Az egyszerű desztillációt olyan elegyek szétválasztására használjuk, amelyekben a két komponens illékonyasága különbözik egymástól. Az elegy melegítésekor a gőzfázis gazdagodik, míg a folyadékfázis szegényedik az illékonyabb komponensben.

Egy  $L$  mennyiségű és  $x$  illékonyabb komponenskoncentrációjú elegy melegítésekor a folyadék mennyisége  $dL$ -lel, az illékony komponens koncentrációja  $dx$ -szel változik. Felírva az illékony komponens mérlegét következik:

$$L \cdot x = (L - dL) \cdot (x - dx) + dL \cdot (y + dy) \quad (3.9.1)$$

vagyis:

$$L \cdot x = L \cdot x - L \cdot dx - x \cdot dL + dL \cdot dx + dL \cdot y + dL \cdot dy \quad (3.9.2)$$

Elhanyagolva a differenciálszorzatokat, felírható:

$$L \cdot dx = (y - x) \cdot dL \quad (3.9.3)$$

Átrendezve a változók szerint:

$$\frac{dL}{L} = \frac{dx}{y - x} \quad (3.9.4)$$

Integrálva az összefüggést az  $x_1$  és  $x_2$ , illetve  $L_1$  és  $L_2$  határok között, a következő összefüggést kapjuk:

$$\ln \frac{L_1}{L_2} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{y - x} \quad (3.9.5)$$

Az integrál megoldására általában a grafikus módszert alkalmazzuk, ezért megszerkesztjük az  $\frac{1}{y - x} \leftrightarrow x$  görbét, és kiszámítjuk az  $x_1$  és  $x_2$  határok és a görbe alatti felület területét (lásd a 3.9.1. ábrát).

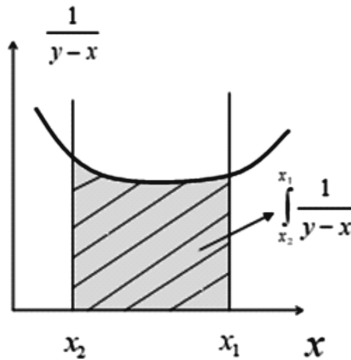
Ha ismert a gőzfázis ( $y$ ) és a folyadékfázis ( $x$ ) koncentrációja közti összefüggés, akkor kézenfekvőbb az analitikus megoldás. Így például, ha az  $y$  és  $x$  közötti összefüggést a (3.9.6)-os Fenske-egyenlet írja le, akkor felírható:

$$y = \frac{\alpha \cdot x}{1 + (\alpha - 1) \cdot x} \quad (3.9.6)$$

$$\begin{aligned} \ln \frac{L_1}{L_2} &= \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{\frac{\alpha \cdot x}{1 + (\alpha - 1) \cdot x} - x} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{1 - x + \alpha \cdot x}{(\alpha - 1) \cdot (1 - x) \cdot x} dx = \\ &= \frac{1}{\alpha - 1} \cdot \ln \frac{x_1}{x_2} + \frac{\alpha}{\alpha - 1} \cdot \ln \frac{1 - x_2}{1 - x_1} \end{aligned} \quad (3.9.7)$$

ahol:  $\alpha$  – a relatív illékonyaság értéke, vagyis:

$$\alpha = \frac{y}{1 - y} \cdot \frac{x}{1 - x} \quad (3.9.8)$$



(Fonyó–Fábrí 2004; Tudose et alii 2001)

**3.9.1. ábra.** A Rayleigh-egyenlet grafikus megoldása

Ha a koncentrációk közötti összefüggés egy egyenes egyenlete (3.9.9.), akkor az integrálás analitikus értéke a következő:

$$y = k \cdot x \quad (3.9.9)$$

$$\ln \frac{L_1}{L_2} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{k \cdot x - x} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{(k - 1) \cdot x} = \frac{1}{k - 1} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x} = \frac{1}{k - 1} \cdot \ln \frac{x_1}{x_2} \quad (3.9.10)$$

Ismerve az integrál értékét, a keletkezett párlat mennyiségét az anyagmérleg segítségével kapjuk meg.

Felírjuk a teljes anyag- és a célkomponens-mérlegegyenleteket a desztilláció kezdeti és végső állapotára:

$$\begin{cases} L_1 = L_2 + P \\ L_1 \cdot x_1 = L_2 \cdot x_2 + P \cdot x_p \end{cases} \quad (3.9.11)$$

Innen kiszámítható a  $P$ , ha ismert az  $x_p$ , és fordítva, ha ismert a  $P$ , ki tudjuk számítani az  $x_p$  értékét, ami nem más, mint az átlagos desztillátum összetétele:

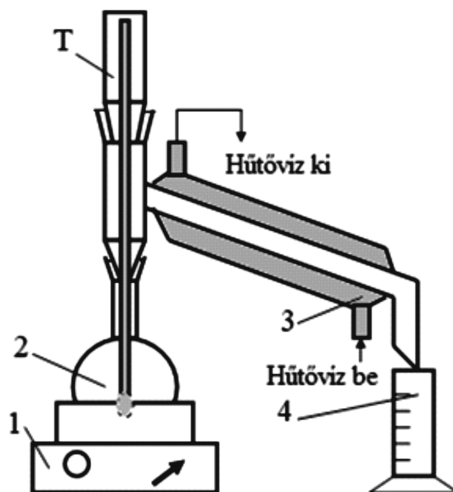
$$x_p = \frac{L_1 \cdot x_1 - L_2 \cdot x_2}{P} \quad (3.9.12)$$

### A gyakorlat célja:

Az egyszeri desztilláció megvalósítása laboratóriumi szinten etanol és víz elegy esetén.

### A gyakorlati berendezés leírása:

Az egyszeri desztilláció megvalósítására a 3.9.2. ábrán bemutatott berendezést alkalmazzuk. Az üvegből készült berendezés tartalmaz egy fűtőkosarat (1), egy gömblombikot (2), egy cső a csőben típusú hőcserélőt (3), valamint egy mérőhengert/gyűjtőlombikot (4). A forrponi hőmérséklet mérésére a T hőmérő szolgál. A berendezés működhet légköri nyomáson vagy vákuumon. Az elegy kezdeti és végső koncentrációját sűrűség- vagy törésmutató-méréssel határozzuk meg.



**3.9.2. ábra.** A gyakorlati berendezés vázlatja:

1 – hőszabályozható fűtőkosár, 2 – gömblombik, 3 – hűtő,  
4 – mérőhenger/gyűjtőlombik, T – hőmérő

### A mérés menete:

– Keverjük össze 100 mL etil-alkoholt és 400 mL desztillált vizet, majd határozzuk meg a kapott elegy hőmérsékletét és sűrűségét, kiszámítva az  $x_1$  koncentráció értékét.

– A 3.9.1. táblázat adatai segítségével szerkesszük meg a 3.9.2. táblázatot: a 0,25–0,03 móltört intervallumban vegyünk fel kb. 10-12 pontot, minden  $x$  értékre határozzuk meg a gőzfázis koncentrációját, majd számítsuk ki az  $y - x$  és az  $1/(y - x)$  értékeket.

– A 3.9.1. táblázat adatai segítségével rajzoljuk meg az  $\frac{1}{y-x} \leftrightarrow x$  görbét.

– Az első alpont szerint elkészített elegyet töltjük be a (2) lombikba, helyezük vissza a T hőmérőt, engedjük meg a hűtővizet és kapcsoljuk be a melegítést (1). Miután megjelentek a párlatcseppek, a hűtővíz segítségével állítsuk be a párlat 293 K hőmérsékletét.

– Amikor összegyűjtöttük a számított párlatmennyiséget (kb. 90 mL), állítjuk meg a melegítést, és hűtsük le a lombikban maradt elegyet.

– Határozzuk meg a párlat és a maradék sűrűségét, térfogatát, tömegét és összetételét (ehhez használjuk a 3.9.3. táblázat adatait).

### 3.9.1. táblázat. Az etanol – víz gőz-folyadékfázisú egyensúlya

A folyadék koncentrációja		A gőzfázis koncentrációja		A folyadék koncentrációja		A gőzfázis koncentrációja	
% tömeg	% mol	% tömeg	% mol	% tömeg	% mol	% tömeg	% mol
5,92	2,40	40,19	20,80	55,74	33,00	78,21	58,40
8,30	3,50	48,99	26,95	59,02	36,00	79,01	59,55
14,04	6,00	58,49	35,45	63,06	40,00	80,01	61,02
18,20	8,00	62,93	39,90	65,88	43,00	80,70	62,05
22,15	10,00	66,50	43,70	67,70	45,02	81,19	62,80
24,00	11,00	67,91	45,28	72,71	51,00	82,73	65,20
28,55	13,50	70,60	48,55	76,50	56,00	84,21	67,60
33,68	16,50	72,62	50,90	81,00	63,00	86,49	71,45
36,76	18,50	73,50	52,00	84,47	68,00	88,03	74,20
39,11	20,00	74,10	52,80	87,38	73,00	89,59	77,10
43,53	23,00	75,16	54,20	90,08	78,00	91,17	80,15
46,05	25,00	75,80	55,05	92,10	82,00	92,59	83,00
49,02	27,00	76,42	55,90	93,10	84,00	93,43	84,70

Forrás: Vegyipari műveleti laboratóriumi gyakorlatok, Veszprém, 2000

### Az adatok feldolgozása és értékelése:

Ismerve a kezdeti és a végső alkoholkoncentrációt, kiszámítjuk az  $x_1$  és  $x_2$  egyenesek által határolt görbe alatti felület területét, és a (3.9.5) összefüggés segítségével meghatározzuk az  $L_2$  értékét, melyet összehasonlítunk a mért értékkel.

Ezt követően a (3.9.11) és (3.9.12) összefüggések segítségével meghatározzuk a párlat mennyiségét és koncentrációját, amelyeket összehasonlítunk a mért értékekkel.

**3.9.2. táblázat.** *A fázisegyensúly a kezdeti és a végső koncentrációk között*

Alkoholtartalom						$y - x$	$\frac{1}{y - x}$
Folyadékfázis			Gőzfázis				
x	% térfogat	% tömeg	y	% térfogat	% tömeg		

**3.9.3. táblázat.** *Az etanol vizes oldatának sűrűsége 288 K hőmérsékleten*

Tf. %	Sűrűség, g/cm <sup>3</sup>	Tf. %	Sűrűség, g/cm <sup>3</sup>	Tf. %	Sűrűség, g/cm <sup>3</sup>	Tf. %	Sűrűség, g/cm <sup>3</sup>
0	0,99823	30	0,96224	50	0,93019	82	0,85369
2	0,99529	32	0,95972	52	0,92822	84	0,84791
4	0,99244	34	0,95704	54	0,92212	86	0,84193
6	0,98974	36	0,95419	58	0,91358	90	0,82926
8	0,98719	38	0,95149	62	0,90462	92	0,82247
10	0,98476	40	0,94866	66	0,89526	94	0,81326
12	0,98239	42	0,94479	70	0,88551	96	0,80748
14	0,98009	44	0,94134	74	0,87538	98	0,80097
22	0,97145	46	0,93755	78	0,86480	100	0,78927
26	0,96628	48	0,93404	80	0,85932		

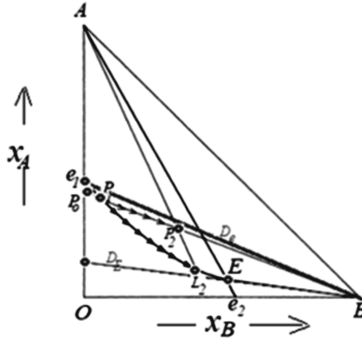
Forrás: Nenişescu 1952.

### 3.10. A kisózás gyakorlati tanulmányozása

A kisózás nem más, mint sók kristályos állapotban történő kinyerése az oldatból, kiszózó anyag adagolása útján (Fonyó–Fábri 2004; Harja et alii 2013). Ebben a műveletben a túltelítettséget egy jól oldódó komponens segítségével állítjuk elő. Amikor a kiinduló oldathoz adagoljuk a túltelítettséget előidéző anyagot – sót, kristályhidrátot, bázist, savat, illetve jól oldódó szerves anyagot –, először elérjük a kisózandó anyag telítettségi fokát, azután pedig a túltelítettségi állapotot.

Ha a kiinduló oldat kétkomponensű, akkor a folyamatot egy háromkomponensű diagramon ábrázolhatjuk. Állandó hőmérséklet és nyomás esetén a háromkomponensű diagram egy egyenlő szárú derékszögű háromszög, melyben egyszerű rendszer esetén négy mezőt találunk (lásd a 3.10.1. ábrát): a telítetlen oldat ( $Oe_1Ee_2$ ) és a három szuszpenzió területét ( $B+$  telített oldat, vagyis  $e_2EB$ ;  $A+$  telített oldat, vagyis  $e_1EA$ ;  $A+B+$  és az  $E$  telített oldat vagyis  $EAB$ ).

Ahhoz, hogy a kisózással sôt kristályosítsunk, szükséges, hogy az adagolást ábrázoló konóda ( $D_e$  és a  $D_E$  jelölt egyenesek között elhelyezkedő egyenes bármelyike) áthaladjon a kisózandó komponens mezején ( $e_iEA$ ). Ha a kiinduló oldat kétkomponensű, akkor a  $P_o$  pont az  $Oe_i$  szakaszon található, ha pedig háromkomponensű, a telítetlen oldat mezejében ( $Oe_iEe_2$ ).



(Harja et alii 2013)

### 3.10.1. ábra. A kisózás ábrázolása a háromkomponensű diagramon

Például ha a kiinduló oldat ebben a mezőben van (lásd a  $P_o$  pont helyzetét a diagramon), és a kisózó  $B$  komponenszt a  $P_oP_2B$  konódának megfelelő arányban adagoltuk, vagyis:

$$\frac{m_{P_o}}{m_B^0} = \frac{\overline{P_2B}}{\overline{P_oP_2}} \quad (3.10.1)$$

akkor a kisózott  $A$  komponens mennyiségét az  $AP_2L_2$  konóda segítségével számíthatjuk, azaz:

$$m_A \cdot \overline{AP_2} = m_L \cdot \overline{P_2L_2} \quad (3.10.2)$$

Ismerve, hogy a  $P_2$  pontban lévő szuszpenzió a kisózó anyag adagolásával keletkezett, felírható:

$$m_{P_2} = m_A + m_{L_2} = m_{P_o} + m_B^0 \quad (3.10.3)$$

A két összefüggésből megkapjuk:

$$m_A = (m_{P_o} + m_B^0) \cdot \frac{\overline{P_2L_2}}{\overline{AL_2}} = m_{P_o} \cdot \left(1 + \frac{\overline{P_oP_2}}{\overline{P_2B}}\right) \cdot \frac{\overline{P_2L_2}}{\overline{AL_2}} \quad (3.10.4)$$

Ismerve a használt  $B$  komponenszt és kiszámítva a kisózott  $A$  komponens mennyiségét, meghatározható a transzformációs fok ( $\eta_A$ ) és a fajlagos kisózó anyagszükséglet ( $FA$ ):

$$\eta_A = \frac{m_A}{m_A^0} = \frac{(1 + \frac{P_0 P_2}{P_2 B}) \cdot \frac{P_2 L_2}{AL_2}}{x_A^0} \quad (3.10.5)$$

$$FA_B = \frac{m_B^0}{m_A} = \frac{1 + \frac{P_0 P_2}{P_2 B}}{\left(1 + \frac{P_0 P_2}{P_2 B}\right) \cdot \frac{P_2 L_2}{AL_2}} \quad (3.10.6)$$

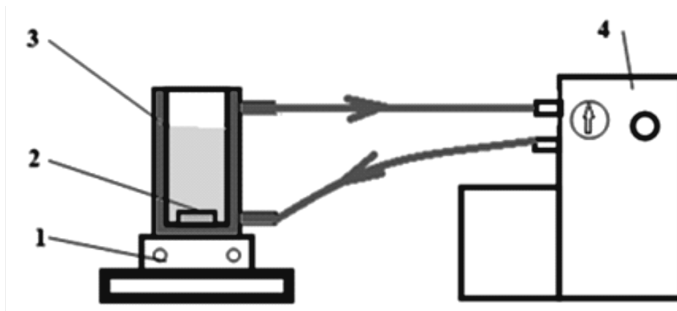
Amikor a kiszóó anyag nem tiszta, hanem különbözik a  $B$  pontnak megfelelő koncentrációtól, akkor az adagolási konódát nem a  $B$  pontból húzzuk, hanem az  $e_2 B$  szakaszon elhelyezkedő, a használt anyag koncentrációjának megfelelő pontból.

### A gyakorlat célja:

- A kiszóás mint művelet megismerése és annak laboratóriumi szinten történő megvalósítása.
- A kiszóási egyensúlyi/elméleti és valós transzformációs fok és anyagkihasználás meghatározása a kiszóó anyag koncentrációjának függvényében.

### A gyakorlati berendezés:

Az izoterm-izobár körülményű kiszóás megvalósítására a 3.10.2. ábrán lévő berendezést alkalmazzuk. Ez tartalmaz egy mágneses keverővel (1) és fűtőköppennyel ellátott üstöt (3) és egy 4 L-es termosztátot (4). A mérési feladat még egy szűrőberendezést, egy szárítót és egy technikai mérleget igényel.



**3.10.2. ábra.** A kiszóás gyakorlati meghatározása:

- 1 – mágneses keverő, 2 – mágnes rúd,  
3 – köpenyes kristályosító edény, 4 – termosztát

**A mérési feladat:**

– Először beállítjuk a termosztát hőmérsékletét 315 K fokra, és beindítjuk a termosztát melegítését.

– A kristályosító űrtartalmának megfelelően elkészítünk 80-100 g 20%-os nátrium-szulfát-oldatot, feloldva a bemért nátrium-szulfátot a 353 K hőmérsékletre melegített desztillált vízben.

– Miután az oldat lehűlt és elérte a megszabott hőmérsékletet (minimum 315 K), a kristályosító edénybe töltjük.

– A kristályosító edénybe adagoljuk a szükséges kisózó, ismert koncentrációjú, kb. 315 K hőmérsékletre melegített etilalkoholt úgy, hogy a keletkezett keverékben a víz és az alkohol tömegaránya 1:1 legyen.

– Kb. 30 percnyi izoterm kristályosítás után leszűrjük a keletkezett kristályokat, alkohollal lemossuk (vigyázat, a műveletek alatt ne csökkenjen a hőmérséklet 311 K alá) és szárítószekrénybe tesszük.

– Fél óra szárítás után a kristályokat kivesszük, lemérjük, majd 10 percre újra visszatesszük a szárítóba és ismét lemérjük. A 10 perces szárítást mindaddig folytatjuk, míg a két utolsó mérés különbsége kisebb lesz 0,002 g-nál.

– A mérési eredményeket a 3.10.1. táblázatban rögzítjük.

**3.10.1. táblázat. A mért adatok**

S.sz.	Oldat-mennyiség, g	Alkohol-koncentráció, %	Alkohol-mennyiség, g	Kisózott anyag-mennyiség, g

**Az adatok feldolgozása, számítások és kiértékelésük:**

A szárítás ideje alatt megrajzoljuk a háromkomponensű diagramot és ábrázoljuk a kisózási folyamatot. Ezért minimum 10 x 10 cm méretű milliméterpapírra megrajzoljuk a háromszöget, majd a 3.10.2. táblázat adatai segítségével megrajzoljuk az egyensúlyi görbét.

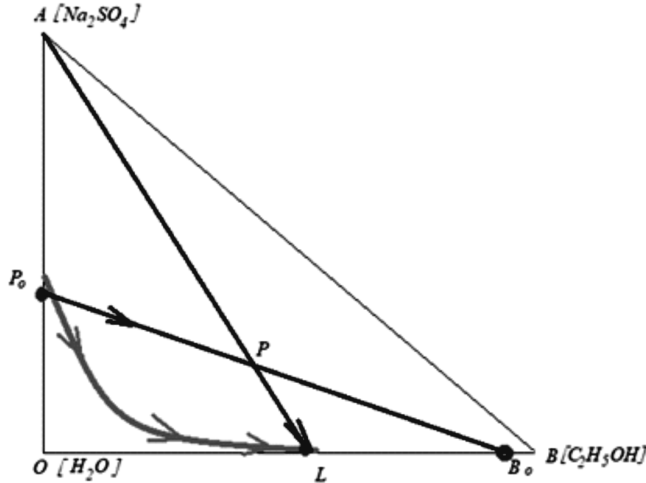
**3.10.2. táblázat. A  $Na_2SO_4$  oldhatósága a víz-etilalkohol oldatba 309 K hőmérsékleten, tömegszázalékban kifejezve**

<b>Alkoholkoncentráció</b>	10	20	30	40	50	60
<b>A szulfát oldhatósága</b>	27,20	12,40	4,80	1,90	0,80	0,42

Forrás: Nenişescu 1952.



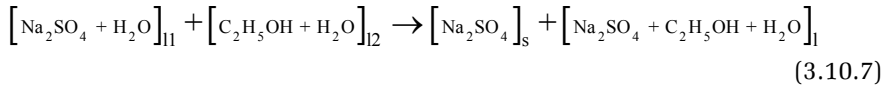
A kiinduló oldatok koncentrációjának megfelelően ábrázoljuk a  $P_o$  és  $B_o$  figuratív pontokat (lásd a 3.10.3. ábrát), majd húzzuk meg az adagolási egyenest ( $P_oB_o$ ). Felvesszük az egyensúlyi görbén a végső oldat alkoholtartalmának megfelelő pontot ( $L$ ) és összekötjük az  $A$  ponttal. Az így megkapott kristályosítási konóda ( $APL$ ) segítségével kiszámítjuk a keletkezett só mennyiségét, amelyet összehasonlítunk az anyagmérlegből számítottal.



3.10.3. ábra. Az alkoholos kisózás ábrázolása az egyensúlyi diagramon

A só mennyiségének az anyagmérlegből történő kiszámításához a (3.10.7) és a (3.10.8) egyenletekből kell kiindulni:

Fázis- és komponensmérleg:



A tömeg- és komponensmegmaradás tétele:

$$\begin{cases} m_{11}^0 + m_{12}^0 = m_s + m_l \\ m_{11}^0 \cdot X_{\text{Na}_2\text{SO}_4}^0 + m_{12}^0 \cdot 0 = m_s \cdot 1 + m_l \cdot X_{\text{Na}_2\text{SO}_4} \\ m_{11}^0 \cdot 0 + m_{12}^0 \cdot X_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}^0 = m_s \cdot 0 + m_l \cdot X_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} \\ m_{11}^0 \cdot X_{\text{H}_2\text{O}}^{01} + m_{12}^0 \cdot X_{\text{H}_2\text{O}}^{02} = m_s \cdot 0 + m_l \cdot X_{\text{H}_2\text{O}} \end{cases} \quad (3.10.8)$$

ahol:  $m_{11}^0$  – a szulfátoldat tömege, g;  $m_{12}^0$  – a kisózó alkohol tömege, g;  $m_l$  – a keletkezett elegy tömege, g;  $m_s$  – a kisózott szulfát tömege, g;  $X_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}^0$ ,  $X_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}$  – a kisózó, illetve a végső oldatban levő etanol tömegtörtje, g/g;  $X_{\text{H}_2\text{O}}^{01}$ ,  $X_{\text{H}_2\text{O}}^{02}$  – a szulfátoldat, illetve a kisózó alkohol víztartalma tömegtörtben

kifejezve, g/g;  $X_{H_2O}$  – az oldat víztartalma tömegtörtben kifejezve, g/g;  $X_{Na_2SO_4}^0$ ,  $X_{Na_2SO_4}$  – a kiinduló szulfátoldat, illetve a keletkezett oldat szulfáttartalma tömegtörtben kifejezve, g/g.

Megoldjuk az egyensúlyi anyagmérleget, és kiszámítjuk a keletkezett szulfát mennyiségét. Ennek segítségével meghatározzuk a kisózás egyensúlyi transzformációs fokát:

$$\eta = \frac{m_s}{m_{H_2O}^0 \cdot X_{Na_2SO_4}^0} \quad (3.10.9)$$

A végső bemért szulfáttömeg segítségével meghatározzuk a kisózás gyakorlati transzformációs fokát és a fajlagos anyagkihasználás értékét a (3.10.6) összefüggéssel.



## **MELLÉKLETEK**



**M1. Néhány szilárd anyag szobahőmérsékleten mért sűrűsége**

Anyag	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>		Anyag	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	
	Valós	Ömlesztett		Valós	Ömlesztett
Agyag	–	1380	Kőszén	1350	800
Antracit	1600	–	Kréta	2200	1300
Bazalt	–	3000	Kvarc	2650	1500
Beton	2300	–	Márvány	2600	–
Bőr	860	–	Mészke	2650	1500–1800
Cement	2900	–	Parafa	240	–
Faszén	1450	200	Közönséges tégl	1500	–
Fenyőfa	500	–	PVC	1380	–
Száraz föld	1800	1300	Szóda	1450	600–800
Gipsz	2240	1300	Üveg	2500	–
Gránit	2700	–	Zománc	2350	–
Gumi	930	–	Magnezit tégl	2900	–
Gyanta	1500	–	Samott tégl	1900	–
Hamu	2200	680	Acél	7850	–
Homok	1500	1200	Alumínium	2700	–
Kaolin	2200	1500	Réz	8800	–
Kerámia	2600	–	Ólom	11400	–
Koksz	1300	500	Sárgaréz	8500	–
Kősó	2350	1020	Nyersvas	7250	–

Forrás: Cristian–Horoba–Mureşan 2005.

**M2. Néhány folyadék sűrűsége 293 K hőmérsékleten**

Folyadék (koncentráció)		Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	Folyadék (koncentráció)	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	
Aceton		810	Kloroform	1530	
Ammóniaoldat, 25%		910	Metanol	100%	800
Ásványi olaj		790–950		90%	820
Benzin		760		30%	950
Benzol		900	Nátrium-klorid-oldat, 25%		1189
Diklór-éter		1250	Nátronlúg, 10%		1110
Ecetsav	100%	1060	Nátronlúg, 30%		1330
	70%	1070	Pakura		890–950
	30%	1040	Petróleum		850
Etanol	100%	790	Salétromsav-oldat, 92%		1500
	70%	850	Sósav	10%	1047
	40%	920		15%	1072
	10%	980		20%	1098
	Fenololvadék			1060	25%
Glicerín		1270		30%	1150
Kalcium-klorid-oldat, 25%		1195	Sósav (füstölő)		1198

Folyadék (koncentráció)		Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	Folyadék (koncentráció)	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>
Kénsav	98%	1830	Szén-tetra-klorid	1630
	60%	1500	Toluol	870
	30%	1220	Víz	1000
	10%	1066	Xilol	880

Forrás: Cristian–Horoba–Mureşan 2005; Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M3.** *Néhány cseppfolyós anyag fajlagos hőkapacitása különböző hőmérsékleteken, [J/(kg·K)]*

Megnevezés	Konc.	Hőmérséklet, K					
		273	293	313	333	353	373
Ecetsav	100%	1883	1992	2101	2206	2314	2423
	50%	3055	3097	3139	3181	3265	3306
Salétromsav	98%	1749	1758	1779	1799	1820	1841
	50%	2792	2846	2900	2972	3055	3097
Sósav	30%	2302	2469	2637	2804	3013	3181
Kénsav	98%	1402	1456	1511	1569	1624	1682
	75%	1871	1938	2005	2072	2134	2206
	60%	2197	2281	2365	2448	2532	2616
Etil-alkohol	100%	2289	2482	2712	2963	–	–
	80%	2679	2846	3013	3223	3432	–
	60%	3055	3139	3306	3474	3600	–
	40%	3432	3516	3641	3683	3809	–
	20%	3809	3851	3892	3934	3976	–
Metil-alkohol	100%	2503	2566	2666	2762	–	–
	50%	3516	3558	3589	3599	3641	–
Víz	–	4227	4183	4174	4179	4195	4220
Kén-dioxid	–	1326	1368	1432	1519	1628	1758
CaCl <sub>2</sub> -oldat	25%	2888	2938	2938	2972	3055	3097
NaCl-oldat	20%	3939	3930	3918	3897	3892	3851
NaOH-oldat	50%	–	3235	3219	3210	3202	3193
	40%	–	3378	3419	3457	3474	3482
	30%	–	3449	3516	3583	3620	3637
	20%	–	3524	3608	3662	3692	3708
	10%	–	3692	3767	3817	3842	3859

Forrás: Cristian–Horoba–Mureşan 2005.

**M4. Néhány gáz fontosabb fizikai tulajdonságai**

Megnevezés	Móltömeg, kg/kmol	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup> (273 K, 1 atm)	Kritikus hőmérséklet, K	Kritikus nyomás, atm	Párolgáshő, kJ/kg
Acetilén	26	1,171	308,7	61,6	830
Ammónia	17	0,77	405,4	111,5	1374
Argon	39,9	1,78	150,6	48	163
Benzol	78,1	–	561,5	47,7	394
Etán	30,1	1,36	305,1	48,85	486
Etilén	28,1	1,26	282,7	50,71	482
Hidrogén	2	0,0899	5	12,8	455
Kén-dioxid	64	2,93	430,5	77,78	394
Klór	71	3,22	417	76,1	306
Levegő	28,88	1,293	132,3	37,2	197
Metán	16	0,72	190,85	45,6	511
Nitrogén	28	1,25	125,9	33,49	199,4
Oxigén	32	1,429	154,2	49,71	213
Propán	44,1	2,02	371,6	43	427
Szén-dioxid	44	1,98	304,25	72,9	574
Szén-monoxid	28	1,25	132,8	34,53	212

Forrás: Cristian–Horoba–Mureşan 2005.

**M5. Néhány gáz fontosabb fizikai tulajdonságai**

Megnevezés	Hővezetési tényező, W/(m·K)	Fajlagos hőkapacitás, J/(kg·K)			Viszkozitás*	
		C <sub>p</sub>	C <sub>v</sub>	$k = \frac{C_p}{C_v}$	$\eta_0 \cdot 10^6$ Pa·s	C
Acetilén	0,0184	1680	1360	1,24	9,35	114
Ammónia	0,0215	2220	1680	1,29	9,18	626
Argon	0,0173	530	323	1,66	20,9	142
Benzol	0,0088	1250	1140	1,1	7,2	–
Etán	0,0180	1730	1450	1,2	8,5	287
Etilén	0,0164	1,53	1,26	1,2	9,85	241
Hidrogén	0,1630	14300	10140	1,407	8,42	73
Kén-dioxid	0,0077	633	503	1,25	11,7	396
Klór	0,0072	482	355	1,36	12	351
Levegő	0,0244	1010	721	1,4	17,3	124
Metán	0,0300	2230	1700	1,31	10,3	162
Nitrogén	0,0228	1050	746	1,4	17	114
Oxigén	0,0244	909	649	1,4	20,3	134
Propán	0,0128	1720	1580	1,09	8,74	278
Szén-dioxid	0,0137	838	654	1,30	13,7	254
Szén-monoxid	0,0226	1050	754	1,4	16,6	100

Forrás: Cristian–Horoba–Mureşan 2005; Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.



**M6.** Néhány anyag oldhatósága vízben (g/100 g víz) különböző hőmérsékleteken

Komponens	Hőmérséklet, K					
	273	293	313	333	353	373
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	31,2	36,4	46,1	59,2	73	89
$NH_4Cl$	29,4	37,2	45,9	53,2	65,6	77,3
$(NH_4)_2SO_4$	70,0	75,4	81	88	95,3	103,3
$CaSO_4$	0,173	–	0,2097	0,2047	–	0,1619
$CaCl_2$	59,5	74,5	–	136,8	147,9	159
$Ca(CH_3COO)_2$	37,4	34,7	33,2	32,7	30,5	20,7
$Ca(NO_3)_2$	102	129,3	237,0		358,7	363,6
$CO_2$	0,3346	0,1688	0,0973	0,0576	–	–
$CuSO_4$	14,3	20,7	28,5	40,0	55,0	75,4
$FeCl_3$	74,4	91,8	315,1 <sup>323</sup>		525,8	535,7
$MgCl_2$	52,8	54,5	57,5	61,0	66,0	73,0
$MgSO_4$	53,23	62,9	68,8	55,0	48,0	34,0
$KCH_3COO$	216,7	255,0	323,3	350,0	380,1	396,3
$KNO_3$	13,3	31,6	63,9	110,0	169,0	246,0
$AgNO_3$	122	222	376	525	669	852
$NaCl$	35,7	36,6	36,6	37,3	38,4	39,5
$NaNO_3$	75,0	88	104	124	148	180
$Na_3PO_3$	1,5	11	31	55	81	108
$Na_2SO_4$	5,0	19,4	48,8	45,3	43,7	42,5
$SO_2$	22,83	11,29	5,41	4,55 <sup>323</sup>	–	–
$ZnSO_4$	41,9	54,4	70,4	76,5 <sup>323</sup>	86,6	80,8

Forrás: Nenițescu 1952; Németh 1971.

**M7.** Néhány vizes oldat viszkozitása

Oldott anyag	Konc., %	Hőmérséklet, K				
		273	293	303	313	333
		Dinamikai viszkozitás, mPas				
NaOH	0	1,792	1,005	0,8007	0,656	0,4688
	5	–	1,30	1,05	0,85	–
	15	–	2,78	2,1	1,65	–
	25	–	7,42	5,25	3,86	–
NaCl	5	1,86	1,07	0,87	0,71	0,51
	15	2,27	1,36	1,07	0,89	0,64
	25	3,31	1,89	–	–	–
NaNO <sub>3</sub>	10	–	1,07	0,88	0,72	0,54
	20	–	1,18	1,03	0,86	0,62
	30	–	1,33	1,30	1,07	0,79

Oldott anyag	Konc., %	Hőmérséklet, K				
		273	293	303	313	333
		Dinamikai viszkozitás, mPa·s				
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	–	1,74	1,38	1,10	–
	20	–	4,02	2,91	2,25	–
	30	–	–	8,35	5,60	–
KOH	10	–	1,23	1,00	0,83	–
	20	–	1,63	1,33	1,11	–
	30	–	2,36	1,93	1,57	–
CaCl <sub>2</sub>	10	2,17	1,27	0,95	–	–
	20	3,14	1,89	1,37	–	–
	35	8,90	5,10	2,01	–	–

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

### M8. A víz fontosabb tulajdonságai

#### a) Sűrűség ( $\rho$ )

Hőmérséklet, K	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	Hőmérséklet, K	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	Hőmérséklet, K	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>
263	998,15	338	980,59	428	917,30
268	999,87	343	977,81	438	907,50
273	999,99	348	974,89	448	897,70
283	999,73	353	971,93	458	886,60
288	999,33	358	968,65	468	875,00
293	998,23	363	965,34	478	864,90
298	997,07	368	961,92	488	850,00
303	995,67	378	958,38	498	837,00
313	992,24	388	951,00	508	823,00
323	998,07	398	943,40	518	809,00
328	985,73	408	935,20	528	799,00
333	983,24	418	926,40	–	–

#### b) Viszkozitás ( $\eta$ )

Hőmérséklet, K	$\eta$ , mPas	Hőmérséklet, K	$\eta$ , mPas	Hőmérséklet, K	$\eta$ , mPas
273	1,7921	313	0,5560	348	0,3799
278	1,5188	318	0,5538	353	0,3565
283	1,3077	323	0,5494	358	0,3355
293	1,0050	328	0,5064	363	0,3165
298	0,8937	333	0,4688	368	0,2994
303	0,8007	338	0,4355	373	0,2838
308	0,7225	343	0,4061	–	–

*c) Fajhő ( $C_p$ )*

Hőmérséklet, K	Fajhő, kJ/(kg·K)	Hőmérséklet, K	Fajhő, kJ/(kg·K)	Hőmérséklet, K	Fajhő, kJ/(kg·K)
273	4,2232	298	4,1772	333	4,1839
278	4,2069	303	4,1773	343	4,1901
283	4,1943	308	4,1759	353	4,1968
288	4,1868	313	4,1768	363	4,2048
293	4,1809	323	4,1797	373	4,2140

Forrás: Iakimenko–Pasmanik 1976.

*M9. A telített vízgőz fontosabb tulajdonságai*

Hőmérséklet, K	Gőznyomás, $\times 10^5$ Pa	Sűrűség, $\text{kg/m}^3$	Kondenzációs hő, kJ/kg
273	0,006108	0,00485	2500
278	0,008791	0,00679	2489
283	0,012271	0,00940	2477
288	0,017041	0,01282	2466
293	0,02336	0,01729	2453
298	0,03235	0,02004	2442
303	0,04241	0,03037	2430
308	0,05622	0,03962	2418
313	0,07110	0,05115	2406
323	0,12335	0,08306	2392
333	0,1992	0,3102	2358
343	0,3117	0,1982	2333
353	0,4736	0,2930	2308
358	0,5780	0,3536	2296
363	0,7011	0,4235	2283
368	0,8452	0,5045	2270
373	1,0132	0,5977	2257
383	1,4327	0,8264	2230
388	1,6906	0,9652	2216
393	1,9856	1,121	2203
413	3,685	1,962	2150
473	15,850	7,840	1945

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M10. A telített vízgőz és kondenzátum fontosabb tulajdonságai**

Abszolút nyomás, ata	Hőmérséklet, K	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	Entalpia, kJ/kg		Latens hő, kJ/kg
			Cseppfolyós	Gőz	
0,05	305,6	0,0348	136,2	2556	2420
0,06	308,95	0,0413	150,0	2562	2413
0,08	314,3	0,0542	172,2	2573	2400
0,10	318,5	0,0668	190,2	2581	2390
0,12	322,1	0,0793	205,3	2588	2382
0,15	326,7	0,0979	224,6	2596	2372
0,20	332,8	0,1283	250,1	2607	2358
0,30	341,8	0,1876	287,9	2620	2336
0,40	348,5	0,2456	315,9	2632	2320
0,50	354,0	0,3027	339,0	2642	2307
0,60	358,6	0,3590	358,2	2650	2296
0,70	362,4	0,4147	375,0	2657	2286
0,80	366,1	0,4699	389,7	2663	2278
0,90	369,3	0,5246	403,1	2668	2270
1,00	372,2	0,5790	415,2	2677	2264
1,20	377,3	0,6865	437,0	2686	2249
1,40	381,8	0,7931	456,3	2693	2237
1,60	385,8	0,8980	473,1	2703	2227
1,80	389,4	1,0030	483,6	2709	2217
2,00	392,7	1,1070	502,4	2710	2208
3,00	406,0	1,1680	558,9	2730	2171
4,00	416,0	2,1200	601,1	2744	2141
5,00	424,2	2,6140	637,7	2754	2117
6,00	431,2	3,1040	667,9	2768	2095
7,00	437,3	3,5910	694,3	2769	2075
8,00	442,7	4,0750	718,4	2776	2057
9,00	447,6	4,5360	740,0	2780	2040
10,00	452,1	5,0370	759,6	2784	2024

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M11. A telített víz fontosabb tulajdonságai**

p, at	T, K	$\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c_p, \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	$\lambda, \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$\eta, \text{mPas}$	$\sigma, 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	Pr-szám
1	273	999,9	4212	0,551	1,789	756,4	13,67
1	283	999,7	4191	0,574	1,306	741,6	9,52
1	293	998,2	4183	0,5999	1,006	726,9	7,02
1	303	995,7	4174	0,618	0,805	712,2	5,42
1	313	992,2	4174	0,635	0,659	696,5	4,31
1	323	988,1	4174	0,648	0,556	676,9	3,54
1	333	983,1	4179	0,659	0,478	662,2	2,98
1	343	977,8	4187	0,668	0,415	643,5	2,55
1	353	971,8	4195	0,674	0,365	625,9	2,21
1	363	965,3	4208	0,680	0,326	607,2	1,95
1,03	373	958,4	4220	0,683	0,295	588,6	1,75
1,46	383	951,0	4233	0,685	0,272	569,0	1,60
2,02	393	943,1	4250	0,686	0,252	548,4	1,47
2,75	303	934,8	4266	0,686	0,233	528,8	1,36
3,68	413	926,1	4287	0,685	0,217	507,2	1,26
4,85	423	917,0	4313	0,684	0,203	486,6	1,17
6,30	433	907,0	4346	0,683	0,191	466,0	1,10
8,08	443	897,3	4380	0,679	0,181	443,4	1,05
10,23	453	886,9	4417	0,674	0,173	422,8	1,00

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M12. A levegő fontosabb tulajdonságai**

T, K	$\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c_p, \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	$100 \lambda, \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$a, 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$\nu, 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr
223	1,584	1013	2,04	12,7	9,23	0,7280
233	1,515	1013	2,12	13,8	10,04	0,7280
243	1,453	1013	2,20	14,9	10,80	0,7230
253	1,395	1010	2,28	16,2	11,59	0,7162
263	1,342	1010	2,36	17,4	12,43	0,7138
273	1,293	1005	2,44	18,8	13,28	0,7072
283	1,247	1005	2,51	20,0	14,16	0,7070
293	1,205	1005	2,59	21,4	15,06	0,7042
303	1,165	1005	2,67	22,9	16,00	0,7016
313	1,128	1005	2,76	24,3	16,96	0,6966
323	1,093	1005	2,83	25,7	17,95	0,6967
333	1,060	1005	2,89	27,2	18,97	0,6993
343	1,029	1010	2,97	28,6	20,02	0,7006
353	1,000	1010	3,05	30,2	21,06	0,6974

T, K	$\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c_p, \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	$100 \lambda, \frac{\text{W}}{(\text{mK})}$	$\alpha, 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$\nu, 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr
363	0,972	1010	3,13	31,9	22,10	0,6932
373	0,946	1010	3,21	33,6	23,13	0,6885
393	0,898	1010	3,34	36,8	25,45	0,6911
473	0,746	1026	3,93	51,4	34,85	0,6789
573	0,615	1047	4,60	71,6	48,33	0,6740

Forrás: Green–Perry 2008.

**M13. A nátrium-klorid-oldat fontosabb tulajdonságai**

**a) Sűrűség,  $\text{kg/m}^3$**

NaCl, %	T, K				
	293	303	323	333	353
16	1116,2	1111,7	1101,7	1096,2	1084,2
18	1131,9	1127,1	1116,9	1111,3	1099,3
20	1148,0	1142,8	1134,4	1126,8	1114,6
22	1163,9	1158,8	1148,1	1142,5	1139,3
24	1180,4	1175,1	1164,1	1158,5	1146,3
26	1197,1	1191,7	1180,4	1174,7	1162,6

**b) Viskozitás, mPas**

NaCl, %	T, K				
	293	313	333	353	373
17,9	1,387	0,969	0,701	0,537	0,433
22,6	1,641	1,119	0,808	–	–
24,7	1,787	–	–	–	–
26,3	1,933	–	–	–	–

**c) Hővezetési tényező,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$**

NaCl, %	T, K		
	273	283	293
15,0	0,552	0,568	0,583
20,0	0,547	0,563	0,578
23,5	0,544	0,558	0,575
25,0	0,542	0,558	0,573

**d) Fajhő,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$**

NaCl, %	T, K			
	293	313	323	333
2	3425	3442	3454	3458
12	3375	3387	3400	3404
24	3320	3337	3345	3354
26	3266	3283	3291	3295

Forrás: Iakimenko–Pasmanik 1976.

**M14. A nátrium-hidroxid-oldat fontosabb tulajdonságai****a) Fajhő, kJ/(kg·K)**

T, K	NaOH, %					
	10	20	40	60	70	78
273	3,696	3,528	–	–	–	–
277,5	3,721	3,553	–	–	–	–
283	3,742	3,578	3,402	–	–	–
288,75	3,758	3,599	3,415	–	–	–
299,8	3,792	3,637	3,440	–	–	–
310,9	3,817	3,666	3,461	2,958	–	–
321,9	3,838	3,687	3,474	2,954	–	–
333	3,846	3,704	3,482	2,946	2,744	–
344,25	3,854	3,712	3,486	2,937	2,736	–
355,3	3,863	3,712	3,486	2,929	2,728	–
366,4	3,867	3,717	3,486	2,920	2,720	2,598
422	–	–	–	2,883	2,682	2,560

**b) Sűrűség, kg/m<sup>3</sup> (T=288 K hőmérsékleten)**

Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	Koncentráció		Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	Koncentráció	
	%	g/L		%	g/L
1134	11,90	134,9	1332	30,00	399,6
1152	13,50	155,5	1370	33,73	462,1
1170	15,06	176,2	1384	35,11	485,9
1180	16,00	188,8	1411	37,75	532,7
1210	18,71	226,4	1439	40,58	598,3
1230	20,00	253,6	1453	42,02	610,6
1263	23,30	296,8	1483	45,16	669,7
1285	25,50	327,7	1498	46,73	700,0
1308	27,65	361,7	1514	48,41	732,9
1320	28,83	380,6	1530	50,10	766,5

**c) Viskozitás, mPa·s**

Koncentráció (293 K), g/L	T, K			
	291	298	313	333
40	1,292	1,090	0,800	0,573
80	1,582	1,327	0,967	0,689
163	2,694	2,220	1,555	1,051
202	3,472	2,769	1,889	1,268
250	4,807	3,766	2,454	1,564

Forrás: Iakimenko–Pasmanik 1976.

**M15. A sósav fontosabb tulajdonságai****a) Viskozitás ( $\eta$ )**

HCl, %	$\eta$ , mPa·s	HCl, %	$\eta$ , mPa·s	HCl, %	$\eta$ , mPa·s
0	1,005	17,950	1,333	26,940	1,611
3,757	1,065	20,000	1,360	29,900	1,731
5,000	1,080	20,800	1,408	29,950	1,799
7,385	1,125	21,430	1,430	32,800	1,870
8,790	1,168	22,370	1,452	36,530	2,004
10,890	1,187	23,500	1,482	39,140	2,183
14,290	1,251	23,910	1,500	40,610	2,266
17,590	1,323	25,430	1,555	–	–

**b) Relatív sűrűség ( $d$ )**

HCl, %	T, K				
	293	313	333	353	373
1	1,0052	0,9970	0,9881	0,9768	0,9636
2	1,0082	1,0019	0,9930	0,9819	0,9688
4	1,0181	1,0116	1,0026	0,9919	0,9791
6	1,0279	1,0211	1,0121	1,0016	0,9812
8	1,0376	1,0305	1,0215	1,0111	0,9992
10	1,0474	1,0400	1,0310	1,0206	1,0090
14	1,0675	1,0594	1,0502	1,0398	1,0286
18	1,0878	1,0790	1,0694	1,0590	1,0479
22	1,1083	1,0986	1,0886	1,0780	1,0668
24	1,1290	1,1085	1,0982	1,0874	1,0761
28	1,1392	1,1280	1,1169	1,1058	1,0942
30	1,1493	1,1376	1,1260	1,1149	1,1030

**c) Fajhő ( $C_p$ ), kJ/(kg·K)**

HCl, %	T, K						
	273	276,4	293	293,6	313,5	333	333,6
4,00	3,897	3,897	–	3,891	3,531	–	–
10,20	–	3,463	–	3,498	3,254	–	3,579
15,50	–	3,151	–	3,196	2,978	–	–
16,80	3,017	–	3,101	–	–	3,268	–
21,49	–	2,871	–	2,919	2,791	–	3,029
25,81	–	2,697	–	2,753	2,598	–	2,874
28,00	2,556	–	2,644	–	–	2,807	–
31,72	–	2,503	–	2,555	2,532	–	2,705
33,60	2,430	–	2,476	–	–	2,673	–
37,70	–	2,374	–	2,441	–	–	2,664
41,40	2,304	–	–	–	–	2,556	–

**d) Hővezetési tényező ( $\lambda$ ), W/(m·K)**

HCl, %	T, K				
	273	283	293	303	308
10	0,575	0,535	0,488	0,442	0,419
30	0,618	0,586	0,518	0,465	0,440

Forrás: Iakimenko–Pasmanik 1976.



**M16. Néhány vizes oldat viszkozitása (mPa s)**

Oldat		Hőmérséklet, K				
Komponens	Koncentráció, %	273	293	303	313	333
NaOH	5	–	1,30	1,05	0,85	–
	15	–	2,78	2,10	1,65	–
	25	–	7,42	5,25	3,86	–
NaCl	5	1,86	1,07	0,87	0,71	0,51
	15	2,27	1,36	1,07	0,89	0,61
	25	3,31	1,89	–	–	–
NaNO <sub>3</sub>	10	–	1,07	0,88	0,72	0,54
	20	–	1,18	1,03	0,86	0,62
	30	–	1,33	1,3	1,07	0,79
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	–	1,74	1,38	1,10	–
	20	–	4,02	2,91	2,25	–
	30	–	–	8,35	5,60	–
KOH	10	–	1,23	1,0	0,83	–
	20	–	1,63	1,33	1,11	–
	30	–	2,36	1,93	1,57	–
KCl	5	1,70	0,999	0,8	0,66	0,48
	15	1,58	1,00	0,83	0,69	0,52
	20	–	1,02	0,85	0,72	0,54
KNO <sub>3</sub>	5	1,68	0,98	0,8	0,66	0,49
	15	–	0,98	0,8	0,69	0,51
	30	–	–	0,89	–	–
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	10	1,58	0,96	0,79	0,66	0,50
	30	1,51	1,00	0,84	0,73	0,57
	50	–	1,33	1,14	0,99	0,77
MgCl <sub>2</sub>	10	2,80	1,50	–	–	–
	20	5,30	2,70	–	–	–
	35	19,3	10,1	–	–	–
CaCl <sub>2</sub>	10	2,17	1,27	–	–	–
	20	3,14	1,89	–	–	–
	35	8,90	5,10	–	–	–

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M17.** Néhány vizes oldat hővezetési tényezője a koncentráció és a hőmérséklet függvényében

Oldott anyag	Koncentráció, %	Hőmérséklet, K	$\lambda$ , W/(m·K)
NH <sub>3</sub>	26	281	0,45
BaCl <sub>2</sub>	21	305	0,58
KBr	40	305	0,50
KOH	21	305	0,58
	42	305	0,55
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10	305	0,60
KCl	15	305	0,58
	30	305	0,56
MgSO <sub>4</sub>	22	305	0,59
MgCl <sub>2</sub>	11	305	0,58
	29	305	0,52
CuSO <sub>4</sub>	18	305	0,58
NaBr	20	305	0,57
	40	305	0,54
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	305	0,58
NaCl	12,5	305	0,58
	25	305	0,48
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	30	305	0,52
	60	305	0,44
	90	305	0,35
HCl	12,5	305	0,52
	25	305	0,48
	38	305	0,44
CH <sub>3</sub> COOH	50	298	0,36
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	10	285	0,52
	30	285	0,42
	50	286	0,32
	70	287	0,24
	90	288	0,19

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M18. Gázok Henry-állandó értékei a hőmérséklet függvényében**  
( $H \times 10^6$  Hgmm)

Gáz	Hőmérséklet, K							
	273	283	293	303	313	333	353	373
Acetilén	0,55	0,73	0,92	1,11	–	–	–	–
Ammónia	0,0155	0,0180	0,0208	0,0241	–	–	–	–
Bróm	0,0162	0,0278	0,0451	0,0688	0,101	0,191	0,307	–
Etán	9,55	14,4	20	26	32,2	42,9	50,2	52,6
Etilén	4,19	5,84	7,74	9,62	–	–	–	–
Hidrogén	44	48,3	51,9	55,4	57,1	58,1	57,4	56,6
Kén-dioxid	0,0125	0,0184	0,0266	0,0364	0,0495	0,0836	–	–
Kén-hidrogén	0,203	0,278	0,367	0,463	0,566	0,782	1,03	1,12
Klór	0,204	0,297	0,402	0,502	0,6	0,731	0,73	–
Levegő	32,8	41,7	50,4	58,6	66,1	76,5	81,7	81,6
Metán	17	22,6	28,5	34,1	39,5	47,6	51,8	53,3
Nitrogén	40,2	50,8	61,1	70,2	79,2	90,9	95,9	95,4
Oxigén	19,3	24,9	30,4	36,1	40,7	47,8	52,2	53,3
Sósav	0,0018	0,0196	0,0209	0,0220	0,0227	0,0224	–	–
Szén-dioxid	0,553	0,792	1,08	1,41	1,77	2,59	–	–
Szén-monoxid	26,7	33,6	40,7	47,1	52,9	52,5	64,3	64,3

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M19. Néhány vegytiszta anyag fajhője**

J/(mol·K)

Vegyület (halmazállapot)	$C_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + \dots$			Hőmérséklet- intervallum
	$a$	$b \cdot 10^2$	$c \cdot 10^5$	
Acetilén (g)	42,45	6,057	-5,0367	273–1473
Aceton (g)	72,01	20,117	-12,795	273–1473
Salétromsav (l)	110,029	–	–	298
Sósav (g)	29,148	0,1339	-0,972	273–616
Hidrogén-fluorid (g)	29,679	0,1674	0,09169	273–2473
Kénsav (g)	15,604	–	–	283–318
Levegő (g)	29,006	0,28261	0,05359	–
Etil-alkohol (l)	103,204	–	–	273–298
Etil-alkohol (g)	61,378	15,734	-8,5033	273–1473
Metil-alkohol (l)	75,906	–	–	273–298
Metil-alkohol (g)	42,956	8,3066	-1,8756	273–973
Ammónia (g)	35,173	2,9558	0,442	273–1473
Víz (g)	32,9992	1,339	- 0,17094	273–3773
Nitrogén (g)	29,517	0,8193	- 0,29265	273–3773
Kalcium-karbonát (sz)	82,396	4,978	–	273–1093
Klór (g)	33,6242	1,3678	-1,6077	273–1473
Nitrogén-dioxid (g)	36,090	3,9690	-2,8805	273–1473
Szén-dioxid (g)	76,6435	-0,01842	-6,6151	273–1773
Kén-dioxid (g)	38,933	3,9062	-3,1057	273–1773
Etán (g)	49,404	13,9252	-5,8196	273–1473
Formaldehid (g)	34,2982	4,2705	–	273–1473
Hexán (l)	216,466	–	–	293–373
Hidrogén (g)	29,676	0,16747	0,09169	273–2473
Kén-hidrogén (g)	34,2396	1,5072	–	273–573
Metán (g)	139,336	53,800	-23,9317	273–1473
Oxigén (g)	33,4317	5,4721	0,3663	273–1473
Pentán (g)	114,9276	34,114	-18,99997	273–1473
Propán (g)	68,077	22,6	-13,1214	273–1473
Propén (g)	59,6200	17,723	-10,1739	273–1473
Toluol (g)	94,2406	38,9037	-27,875	273–1473
Kén-trioxid (g)	48,529	9,1942	-8,54525	273–1773

Forrás: Cristian–Horoba–Mureşan 2005.

**M20. Néhány élelmiszer és élelmiszer-alapanyag tulajdonsága**

Anyag	$\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\lambda, \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$c_p, \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
Árpa	480–701	0,11–0,140	1410–1600
Bor	993–1036	0,384–0,494	3730–4095
Burgonya	300–1095	0,603–0,610	3349
Búza	590–850	0,07–0,080	1530
Cukor	878–1600	0,156–0,582	1256–1410
Ecet	1017–1020	–	–
Élesztő	450–500	0,285	2900
Glükóz	1430–1560	0,394	1298–2700
Hal	970–1060	0,420–0,520	2850–3500
Hús	940–1100	0,230–0,490	2512–3056
Keményítő	550–1623	0,107	1131–1867
Laktóz	1530	–	1214
Liszt	400–760	0,122	1700–1884
Margarin	860	–	2720–2930
Melasz	1390–1420	0,394	2700
Méz	1275–1345	0,344	1465–2430
Napraforgóolaj	919	0,167	1775–2130
Növényi olaj	920–936	0,169–0,183	1633–1926
Rizs	560–750	–	–
Rosz	670–740	0,09	1900–2100
Savó	1027	0,541	4080
Sör	1027–1050	0,551–0,626	3765–4077
Szója	715–1015	0,16–0,180	–
Szójaolaj	919	0,175	2100
Tej	1027–1040	0,574	3930–3960
Tejföl	990–1010	0,349–0,360	3725–4640
Törökbúza	600–700	0,14	–
Túró	1080	0,349	1884–2847
Vaj	930	0,201	2200
Verttej	1030	0,453	3935
Zab	350	0,07	1800–2000
Zsír	859–861	0,174	2303

Forrás: Cristian–Horoba–Mureşan 2005.

## M21. Élelmiszer-összetevők termodinamikai tulajdonságai

Tulajdonság	Komponens	Összefüggés	
Fajlagos hőkapacitás, $C_p$ J/(kg·K)	Fehérje	$C_p = 2,0082 \cdot 10^3 + 1,2089 \cdot t - 1,3129 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	
	Zsír	$C_p = 1,9842 \cdot 10^3 + 1,4733 \cdot t - 4,8008 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	
	Szénhidrát	$C_p = 1,5488 \cdot 10^3 + 1,9625 \cdot t - 5,9399 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	
	Rost	$C_p = 1,8459 \cdot 10^3 + 1,8306 \cdot t - 4,6509 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	
	Ásványi só (hamu)	$C_p = 1,0926 \cdot 10^3 + 1,8896 \cdot t - 3,6817 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	
	Víz	$C_p = 4,1762 \cdot 10^3 - 9,0864 \cdot 10^{-2} \cdot t + 5,4731 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$ ( $t = 0 - 150$ °C)	
	Vízjég	$C_p = 2062,3 + 6,0769 \cdot t$	
Hővezetési tényező, $\lambda$ , W/(m·K)	Fehérje	$\lambda = 1,7881 \cdot 10^{-1} + 1,1958 \cdot 10^{-3} \cdot t - 2,7178 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	
	Zsír	$\lambda = 1,8071 \cdot 10^{-1} - 2,7604 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1,7749 \cdot 10^{-7} \cdot t^2$	
	Szénhidrát	$\lambda = 2,0141 \cdot 10^{-1} + 1,3874 \cdot 10^{-3} \cdot t - 4,3312 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	
	Rost	$\lambda = 1,8331 \cdot 10^{-1} + 1,2497 \cdot 10^{-3} \cdot t - 3,1683 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	
	Ásványi só (hamu)	$\lambda = 3,2962 \cdot 10^{-1} + 1,4011 \cdot 10^{-3} \cdot t - 2,9069 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	
	Víz	$\lambda = 5,7109 \cdot 10^{-1} + 1,7625 \cdot 10^{-3} \cdot t - 6,7036 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	
	Vízjég	$\lambda = 2,2196 - 6,2489 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,0154 \cdot 10^{-4} \cdot t^2$	
Sűrűség, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Fehérje	$\rho = 1329 - 0,5184 \cdot t$	
	Zsír	$\rho = 925,59 - 0,41757 \cdot t$	
	Szénhidrát	$\rho = 1599,1 - 0,31046 \cdot t$	
	Rost	$\rho = 1311,5 - 0,36589 \cdot t$	
	Ásványi só (hamu)	$\rho = 2423,8 - 0,28063 \cdot t$	
	Víz	$\rho = 997,18 + 0,0031439 \cdot t - 0,003754 \cdot t^2$	
	Vízjég	$\rho = 916,89 - 0,13071 \cdot t$	
Hődifúzió, $a$ , m <sup>2</sup> /s	Fehérje	$a = 6,8714 \cdot 10^{-8} + 4,7578 \cdot 10^{-10} \cdot t - 1,4646 \cdot 10^{-12} \cdot t^2$	
	Zsír	$a = 9,877 \cdot 10^{-8} - 1,2569 \cdot 10^{-10} \cdot t - 3,8286 \cdot 10^{-12} \cdot t^2$	
	Szénhidrát	$a = 8,0842 \cdot 10^{-8} + 5,3052 \cdot 10^{-10} \cdot t - 2,3218 \cdot 10^{-12} \cdot t^2$	
	Rost	$a = 7,3976 \cdot 10^{-8} + 5,1902 \cdot 10^{-10} \cdot t - 2,2202 \cdot 10^{-12} \cdot t^2$	
	Ásványi só (hamu)	$a = 12,461 \cdot 10^{-8} + 3,7321 \cdot 10^{-10} \cdot t - 1,2244 \cdot 10^{-12} \cdot t^2$	
	Víz	$a = 1,3168 \cdot 10^{-7} + 6,2477 \cdot 10^{-10} \cdot t - 2,4022 \cdot 10^{-12} \cdot t^2$	
	Vízjég	$a = 1,1756 \cdot 10^{-6} - 6,0833 \cdot 10^{-9} \cdot t + 9,5037 \cdot 10^{-11} \cdot t^2$	
Az összetétel ismeretében az élelmiszer termodinamikai tulajdonságának becslésére szolgáló összefüggések:			
$C_p = \sum_i x_i \cdot C_{pi}$	$\lambda = \sum_i \lambda_i \cdot y_i$ vagy $\lambda = \frac{1}{\sum_i \frac{y_i}{\lambda_i}}$	$\rho = \sum_i \rho_i \cdot y_i$	$a = \sum_i a_i \cdot y_i$
Ahol: $x_i, y_i$ – az $i$ komponens tömegtörtje, illetve a térfogattörtje.			

**M22. Néhány hőszigetelő anyag fizikai tulajdonságai**

Megnevezés	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>		Hővezetési tényező, W/(m·K)	Maximális hőmérséklet, K
	por	keverék		
Eternit	–	400	0,085+0,0002·t	723
Diatomit	400–450	–	0,091+0,000287·t	1173
Üvegszál	200	–	0,042+0,00023·t	723
Száraz parafa	–	150–350	0,04–0,06	353
PVC hab	–	30–70	0,05	353
Polisztrénhab	–	20	0,015–0,04	323
Poliuretánhab	–	30–130	0,016–0,032	373
Salakgyapot	170–200	–	0,060+0,000145·t	1023

Forrás: Onița–Ivan 2006.

**M23. Ipari berendezésekben alkalmazott acélcsőméretek**

Külső átmérő, mm	Falvastagság, mm								
	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0
16	*								
18	*								
20	*	*							
25	*	*	*	*					
30	*	*	*	*					
34			*	*	*	*			
38	*	*	*	*	*				
45	*	*	*	*	*	*			
48	*	*	*	*	*	*	*		
57			*	*	*	*	*		
60			*	*	*	*	*		
76				*	*	*	*		
89				*	*	*	*	*	*
102					*	*	*	*	
108				*	*	*	*	*	*
114					*	*	*	*	*
133				*	*	*	*	*	*
140				*	*	*	*		
159					*	*	*		
168				*	*	*	*	*	
219				*		*	*	*	*
273						*	*	*	*
324						*	*	*	*

Forrás: Cristian–Horoba–Mureșan 2005; Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

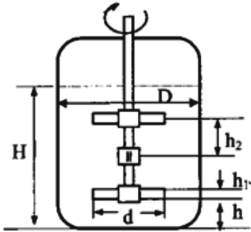
**M24. Néhány töltőtest tulajdonsága**

Típus	Méret, mm	Fajfelület, m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	Szabad térfogat, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	Alak-tényező
Raschig- gyűrű	10 x 10 x 1,5	440	0,700	700	0,420
	15 x 15 x 2	330	0,700	690	0,399
	25 x 25 x 3	200	0,740	530	0,172
	35 x 35 x 3	140	0,780	530	0,262
	50 x 50 x 5	90	0,785	530	0,260
Pall-gyűrű	25 x 25 x 3	220	0,740	610	–
	35 x 35 x 4	165	0,760	540	–
	50 x 50 x 5	120	0,780	520	–
	60 x 60 x 6	96	0,790	520	–
Lessig-gyűrű	15 x 15 x 2	360	0,710	710	–
	25 x 25 x 3	225	0,680	780	–
	35 x 35 x 4	155	0,680	690	–
	50 x 50 x 5	110	0,690	690	–
Berl-nyereg	12,5	460	0,680	720	0,342
	25,0	260	0,690	670	0,317
	35,0	165	0,700	670	0,297

Forrás: Fonyó-Fábrí 2004.



**M25. A keverők teljesítményükségletének meghatározása**

Keverőtípus				$P = \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \cdot \frac{C}{Re^m}$		Megjegyzés
				A C értékek	Az m értékek	
	D/d	H/d	h/d			
Lapát	2	2	0,36	111	1	Re < 20
				14,35	0,39	$10^3 < Re < 5 \cdot 10^4$
Kétkarú	3	3	0,33	6,8	0,2	–
Kétkarú 45° dőlve	3	3	0,33	0,45	0,2	–
Négylapátos	3	3	0,33	8,52	0,2	–
Négylapátos 45° dőlve	3	3	0,33	5,05	0,2	Lefele
				4,42	0,2	Felfele
Négylapátos 60° dőlve	3	3	0,5	6,3	0,18	Lefele
Hatlapátos	1,11	1,11	0,11	12,5	0,25	–
Anker	1,11	1,11	0,11	6,2	0,25	–
Ujj	1,11	1,11	0,11	6,0	0,25	–
Kétlapátos propeller	3	3	0,33	0,985	0,15	–
Háromlapátos propeller	3,8	3,5	1,0	230	1,67	Re < 30
				4,63	0,35	Re < 3000
				1,19	0,15	Re > 3000
Háromlapátos zárt turbina	3	3	0,33	3,9	0,2	–
Hatlapátos turbina	2,4	1,78	0,25	5,98	0,15	–

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M26. A fluidumok tájékoztató áramlássebesség-értékei**

Áramló közeg	Áramlási sebesség, m/s
Természetes huzat	2–4
Légköri nyomáson vagy légköri nyomáshoz közeli nyomáson áramló gáz	5–20
Tartályból kifolyó folyadék	0,1–0,5
Csőben áramló folyadék	0,8–2,5
Telített vízgőz alacsony nyomáson	15–40
Magas nyomású telített vízgőz	40–60
Túlhevített vízgőz	30–50
Szélroham	25–35
Orkán	55–65

Forrás: Fonyó–Fábrí 2004.

**M27. A súrlódási tényező értéke**

Érdesség, mm	Csőátmérő, mm							
	0,025	0,05	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,2
0,2	0,0352	0,0258	0,0253	0,0234	0,0221	0,0211	0,0202	0,0196
0,5	0,0508	0,0380	0,0332	0,0304	0,0284	0,0270	0,0258	0,0249
1,0	0,0648	0,0509	0,0418	0,038	0,0352	0,0332	0,0316	0,0304

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M28. Csövek érdességének átlagos értékei**

Csőtípus	e, mm	Csőtípus	e, mm
Sárgaréz, ólom, vörösréz, üveg, műanyag	0,0015–0,01	Csiszolt betoncső	0,3–0,8
Alumínium	0,015–0,06	Használt öntött vas	1,40
Varrat nélküli és hegesztett acélcsövek jelentéktelen korrózióval	0,20	Sűrített levegőt szállító acélcső	0,80
		Gőzvezeték	0,50
Olajfestéses bádóg	0,125	Kondenzátumvezeték	1,00
Régi, rozsdás acélcső	0,60	Durva felületű betoncső	3,00–8,00

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M29. Helyi ellenállási tényezők értéke**

Ellenállás helye	$\zeta$
Belépés és kilépés a kamrából	0,5–1,5
Forduló az egyik részből a másikba, a közbeeső kamrán keresztül	2,5
A csőtérbe való belépés vagy a csőtérből való kilépés	1,0
Belépés és kilépés a csövek közötti térbe	1,5
Forduló a terelő lemeznél, a csövek közötti részben	1,5
Forduló a csövek közötti térben	1,0

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M30. A helyi ellenállási tényező értékei néhány csőidom esetében**

Az ellenállás fajtája	Az ellenállási tényező, $\zeta$ , értéke							
Belépés a csőbe	0,5 éles széleknél							
	0,2 lekerekített széleknél							
Kilépés a csőből	1							
Éles peremű szűkület, ahol: $m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$	<b>m</b>	0,02	0,04	0,06	0,1	0,16	0,2	
	$\zeta$	7000	1670	730	245	86	51,5	
	<b>m</b>	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9		
	$\zeta$	18,2	8,25	2	0,42	0,13		
90° hajlat	<b>Névleges nyílás, mm</b>			12,5	25	37	50	
	$\zeta$			2,2	2	1,6	1,1	
Normál szelep teljes nyitáskor	<b>d, mm</b>	13	20	40	100	200	250	350
	$\zeta$	10,8	8	4,9	4,1	4,7	5,1	5,5
Csap	<b>Névleges nyílás, mm</b>			13	25	32	38	50
	$\zeta$			4	2	2	2	2

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**M31. A csőfal lerakódásának értéke különböző minőségű közegek esetén**

Hőátviteli közeg	$r^{-1}$ , W/(m <sup>2</sup> ·K)
Ipari víz	1030–1375
Közepes minőségű hűtővíz	1375–2150
Jó minőségű hűtővíz, tisztított víz	2150–4300
Desztillált víz	8600
Tiszta olajtermékek, hűtőközeg-kondenzátumok	2150
Szerves vegyületek, sóoldatok, folyékony hűtőközegek	4300
Szerves gőzök	8600
Levegő	2060

Forrás: Fonyó–Fábrí 2004.

## M32. Dimenziómentes számok jegyzéke

Megnevezés	Jel	Meghatározó összefüggés	Jelölések
Reynolds	$Re$	$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{\rho \cdot w \cdot d}{\eta}$	$\rho, \rho_r, \rho_k$ – az áramló közeg, a részecske, illetve a részecskét körülvevő közeg sűrűsége, kg/m <sup>3</sup> ; $w$ – az áramlási sebesség, m/s; $\eta$ – a közeg dinamikus viszkozitása, Pas; $\nu$ – a közeg kinematikus viszkozitása, m <sup>2</sup> /s; $\alpha$ – a hőkonvekciós tényező, W/(m <sup>2</sup> ·K); $\alpha_v$ – a hőtágulási együttható, m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·K); $g$ – gravitációs gyorsulási tényező, m/s <sup>2</sup> ; $\beta$ – anyagátadási tényező, m/s; $D$ – diffuzivitási tényező, m <sup>2</sup> /s; $l$ – karakterisztikus hossz, m; $\lambda$ – hővezetési tényező, W/(m·K); $C_p$ – fajhő, J/(kg·K); $\Delta T$ – hőmérséklet-különbség, K; $d$ – átmérő (cső, részecske), m.
Euler	$Eu$	$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2}$	
Galilei	$Ga$	$Ga = \frac{Re^2}{Fr} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \rho^2}{\eta^2}$	
Froude	$Fr$	$Fr = \frac{w^2}{g \cdot l}$	
Newton	$Ne$	$Ne = \frac{F \cdot l}{m \cdot w^2}$	
Arhimédész	$Ar$	$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_r \cdot \rho_k \cdot g}{\eta^2}$	
Liascsenko	$Ly$	$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = Re \cdot Fr \cdot \frac{\rho_k}{\rho_r - \rho_k} =$ $= \frac{w^3 \cdot \rho_k^2}{\eta \cdot (\rho_r - \rho_k) \cdot g}$	
Nusselt	$Nu$	$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$	
Prandtl	$Pr$	$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda}$	
Peclet	$Pe$	$Pe = Re \cdot Pr = \frac{\rho \cdot w \cdot c_p \cdot l}{\lambda}$	
Grashoff	$Gr$	$gr = Ga \cdot \alpha_v \cdot \Delta T = \frac{g \cdot l^3}{\nu^3} \alpha_v \cdot \Delta T$	
Sherwood	$Sh$	$Sh = \frac{\beta \cdot l}{D}$	
Schmidt	$Sc$	$Sc = \frac{\nu}{D}$	

**M33. Dimenziómentes összefüggések lemezes hőcserélők esetén**

$$\alpha \cdot \frac{d_e}{\lambda} = C \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\eta} \right)^m \cdot \text{Pr}^n \cdot \Gamma$$

Hőcserélő típus	A paraméterek értékei			
	C	m	n	Γ
Alfa Laval*	0,314	0,65	0,4	1
	0,314	0,65	0,3	1
AVP	0,214	0,65	0,4	1
	0,214	0,65	0,3	1
Rosenblad	0,315	0,73	0,43	$(\text{Pr}/\text{Pr}_{\text{ref}})^{0,25}$
Alfa Laval RII	0,0917	0,73	0,43	$(\text{Pr}/\text{Pr}_{\text{ref}})^{0,25}$

Forrás: Macovei 2001.

**M34. Tapasztalati hőátadási tényező értékek**

Hőátadás jellege	Közeg	$\alpha$ , W/(m <sup>2</sup> · K)	Megjegyzés
Szabad konvekció	Víz	250–900	
	Levegő	3–9	
Kényszer konvekció	Turbulens vízáram csövekben	1200–5800	
	Turbulens levegőáram	35–60	
	Turbulens, csőre merőleges vízáram	3100–10000	
	Turbulens, csőre merőleges légáram	70–100	
	Forrásban lévő víz	2000–24000	$p = 1 \text{ atm}$ $\Delta T = 5 - 15 \text{ K}$
Vízszintes csövekre kondenzáló gőzök	Vízgőz	9300–28000 17500–35000	$\Delta T = 1 - 11 \text{ K}$ $\Delta T = 4 - 37 \text{ K}$
	Etanol gőz	1810–2500	

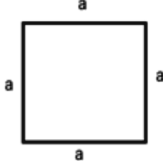
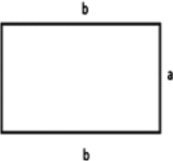
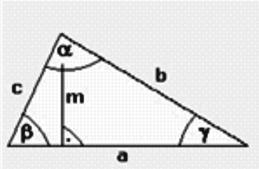
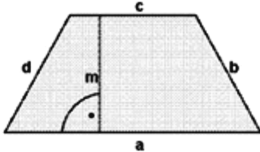
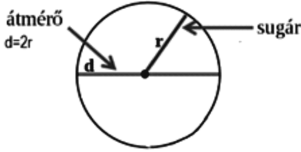
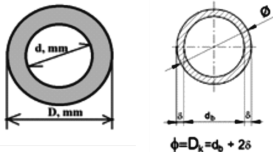
Forrás: Macovei 2001; Gavrilă-Zichil 2000; Fonyó-Fábrı 2004; Onița-Ivan 2006.

**M35. Megközelítő hőátbocsátási értékek különböző hőcserélők esetében**

Hőcserélő típus	A csőben áramló fluidum		A köpenytérben áramló fluidum		K értékek W/(m <sup>2</sup> ·K)
	Neve	Jellemző tulajdonsága	Neve	Jellemző tulajdonság	
Csőköteges	Víz	1,2–1,8 m/s	Gőz	Kondenzáló	2200–4400
	Gáz		Gáz		5–15
Cső a csőben	Folyadék		Folyadék		900–2300
	Gáz		Gáz		10–40
	Gáz		3 ata nyomású levegő		50–580
Korongos	Folyadék		Levegő		6–25
	Gőz	Kondenzáló	Gáz		12–58
Központi csöves bepárló	Víz	Forrásban	Gőz	Kondenzáló	2250–5700
Forráló	Gőz	Kondenzáló	Szerves folyadék	Forrásban	1700–2500

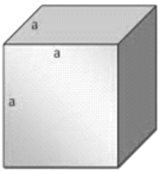
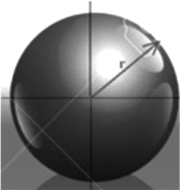
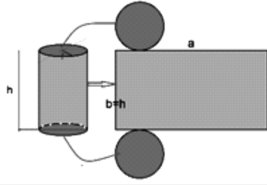
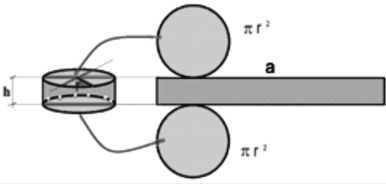
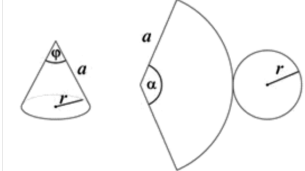
Forrás: Macovei 2001.

## M36. Néhány síkmértani alakzat fontosabb jellemzői

Megnevezése	Idom Alakja és főbb mérete	Kerület m	Felület m <sup>2</sup>
Négyzet		$4 \cdot a$	$a \cdot a$
Téglalap		$2 \cdot (a+b)$	$a \cdot b$
Háromszög		$a+b+c$	$\frac{a \cdot m}{2}$
Trapéz		$a+b+c+d$	$\frac{(a+c) \cdot m}{2}$
Kör		$2 \cdot \pi \cdot r = \pi \cdot d$	$\pi \cdot r^2 =$ $\frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,785 \cdot d^2$
Gyűrű		$\pi \cdot (D+d)$ (nedvesített kerület)	$\frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}$

Forrás: Singh–Heldman 2009 alapján

## M37. Néhány térmértani alakzat fontosabb jellemzői

Megnevezés	Idom	Felület, m <sup>2</sup>	Térfogat, m <sup>3</sup>
Kocka		$6 \cdot a \cdot a$	$a \cdot a \cdot a$
Gömb		$4 \cdot \pi \cdot r^2$	$\frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3}$
Henger		$2\pi \cdot (r^2 + r \cdot h)$	$\pi r^2 \cdot h$
Korong			
Kúp		$\pi r^2 + \pi \cdot r \cdot a$	$\frac{\pi \cdot r^2}{3} \cdot h$

Forrás: Singh–Heldman 2009 alapján



**M38. Néhány fontosabb fizikai mennyiség átalakítási összefüggése**

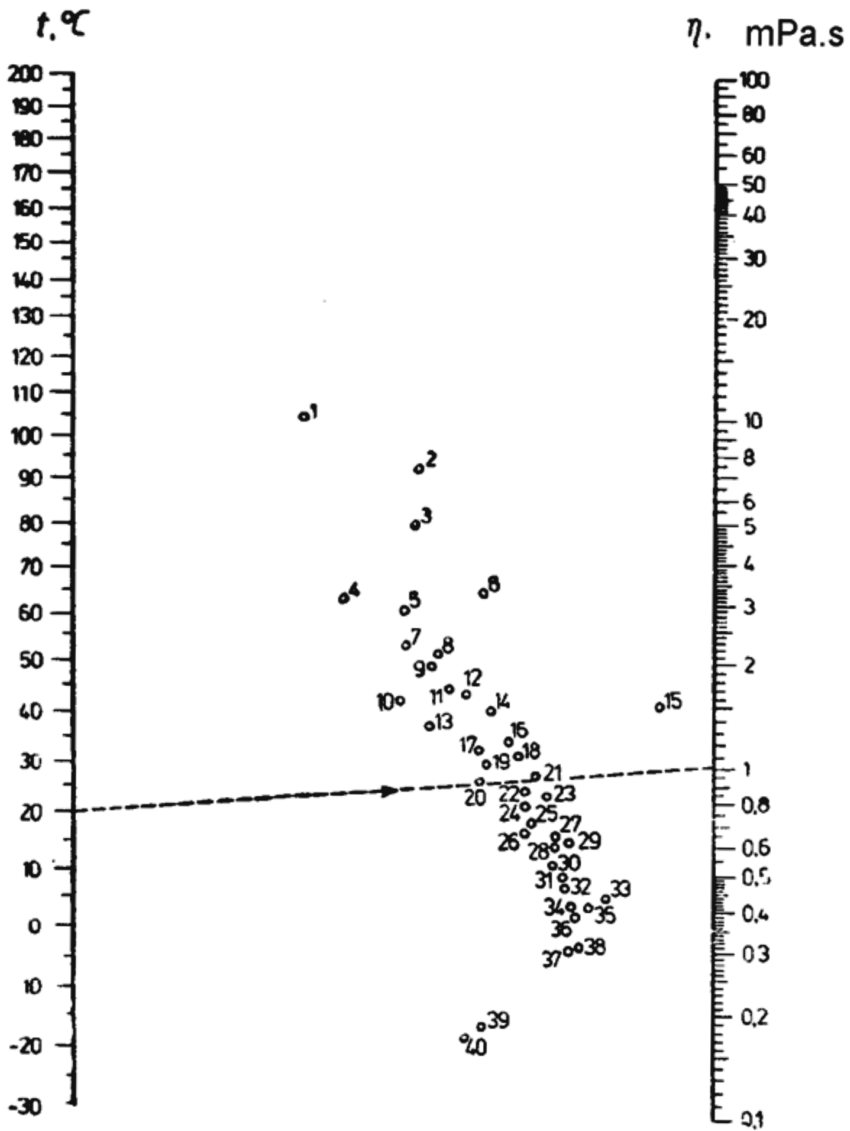
Megnevezés	Átalakítási faktor
Tömeg	1 kg = 1000 g = 0,001 t 1 karát = 0,0002 kg
Hosszúság	1 m = 100 cm = 1000 mm = $10^6 \mu\text{m}$ = 0,001 km 1 inch = 1 coll = 25,4 mm = 0,254 m 1 Å = $10^{-10}$ m 1 mérföld (angol) = 1609 m
Térfogat	1 L = 1000 mL = 1000 cm <sup>3</sup> = 1 dm <sup>3</sup> = 0,001 m <sup>3</sup>
Erő	1 N = 1 kg·m/s <sup>2</sup> 1 dyn = 1 g·cm/s <sup>2</sup> = $10^{-5}$ kg·m/s <sup>2</sup>
Nyomás	1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup> 1 atm = 760 Hgmm = $1,0125 \cdot 10^5$ Pa 1 bar = $10^5$ Pa = $10^5$ N/m <sup>2</sup> 1 psi (pound per square inch) = 6,895 kPa 1 at = 98065 Pa 1 torr = 1 Hgmm = 133,22 Pa 1 mm v.o. = 9,81 Pa
Viszkozitás	1 cP (centipoise) = $10^{-2}$ g/(cm·s) = $10^{-2}$ P = 0,001 Pa·s 1 Pa·s = 1 N·s/m <sup>2</sup> = 1 kg/(m·s) = 1000 cP
Energia	1 cal = 4,1868 J 1 J = 1 N·m = 1 kg·m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> 1 kWh = 3600 kJ
Teljesítmény	1 W = 14,34 cal/min 1 W = 1 J/s 1 LE = 0,7457 kW

Forrás: Cristian–Horoba–Mureşan 2005.

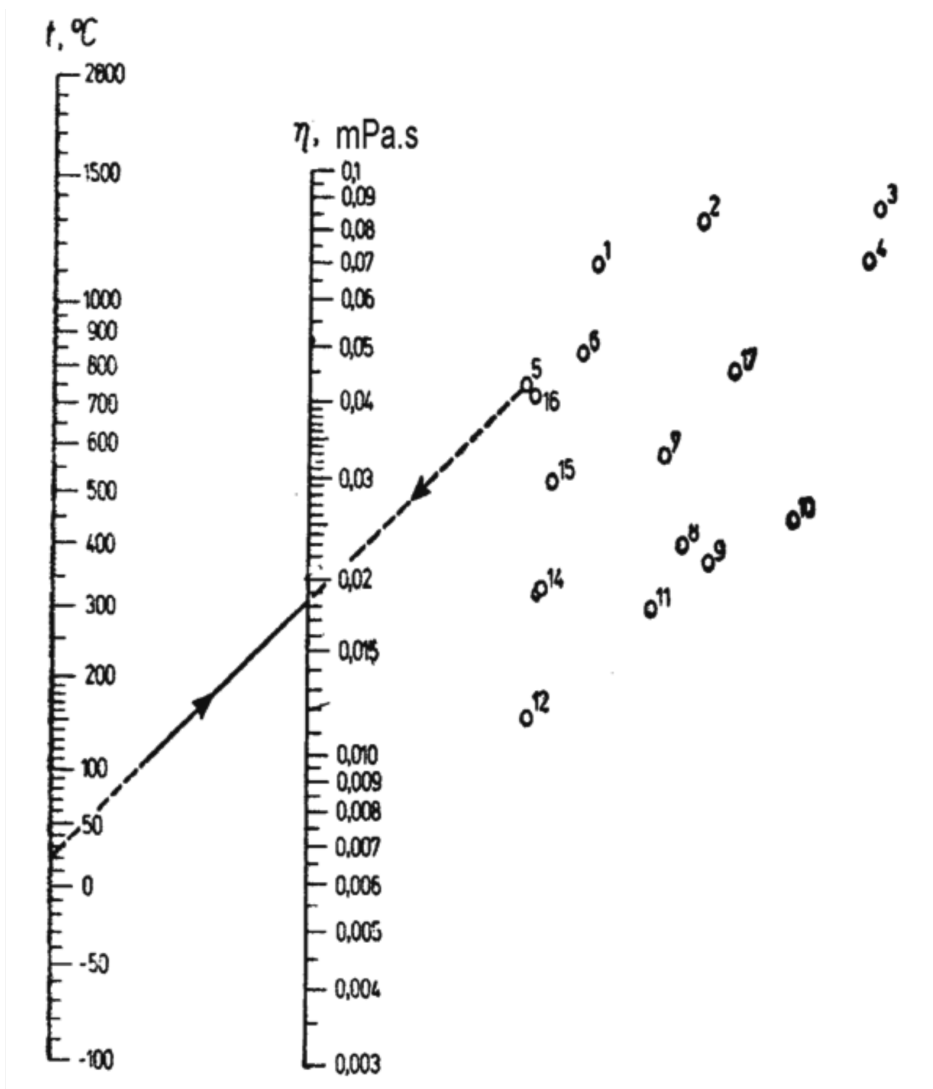
## **NOMOGRAMOK**



N1. A folyadékok dinamikus viszkozitása (lásd az N1-T. táblázatot)



N2. A gázok dinamikus viszkozitása (lásd az N2-T. táblázatot)



**N1-T. táblázat.** Az N1 nomogram pontjainak megfelelő folyadékok

Folyadék (koncentráció)	Szám	Folyadék (koncentráció)	Szám
Aceton	34	Kénsav (60%)	6
Amil-alkohol	17	Kénsav (98%)	3
Ammónia	39	Kén-trioxid	35
Anilin	8	Klórbenzol	22
Benzol	25	Metil-acetát	32
Butil-alkohol	11	Metil-alkohol	26
Ecetsav	18	Metil-alkohol (90%)	24
Ecetsav (70%-os oldat)	12	Metil-alkohol (30%)	13
Etil-acetát	30	Naftalin/	9
Etil-alkohol	19	Nitro-benzol	14
Etil-alkohol (40%-os oldat)	10	Oktán	28
Etilén-glikol	4	Vitriol	2
Etil-éter	37	Pentán	38
Etil-klorid	23	Szén-dioxid	40
Fenol	5	Szén-diszulfid	33
Glicerín	1	Szén-tetraklorid	21
Glicerín (50%-os oldat)	7	Terpentin	16
Heptán	31	Toluol	27
Hexán	36	Víz	20
Higany	15		

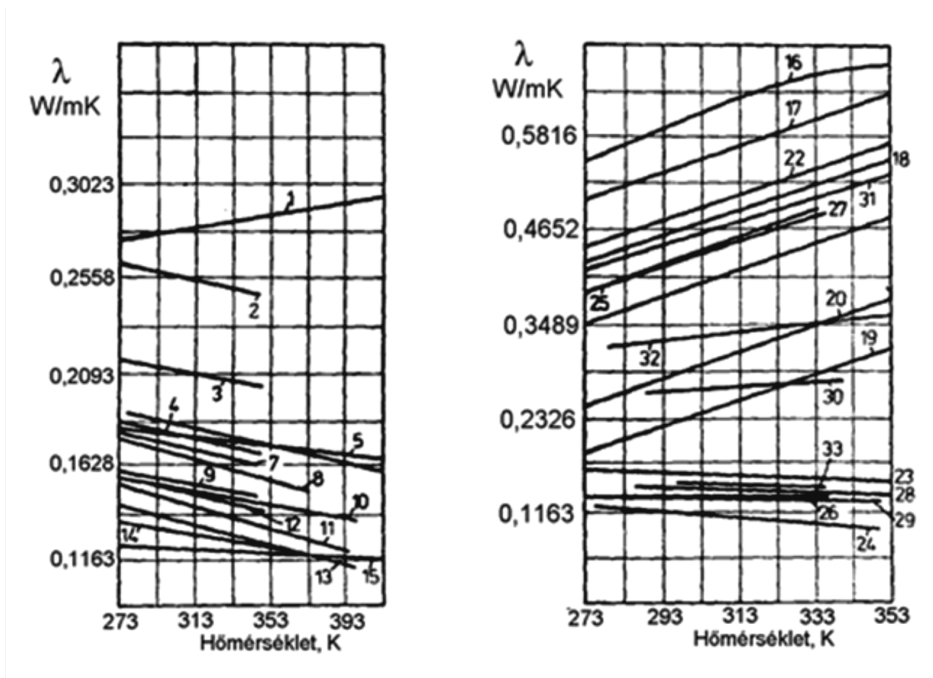
Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

**N2-T. táblázat.** Az N2 nomogram pontjainak megfelelő gázok

A pont száma	Gáz	A pont száma	Gáz	A pont száma	Gáz
1	O <sub>2</sub>	7	SO <sub>2</sub>	13	C <sub>n</sub> H <sub>n</sub>
2	NO	8	CH <sub>4</sub>	14	9H <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>
3	CO <sub>2</sub>	9	H <sub>2</sub> O	15	3H <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>
4	HCl	10	NH <sub>3</sub>	16	CO
5	Levegő	11	C <sub>2</sub> H <sub>n</sub>	17	Cl <sub>2</sub>
6	N <sub>2</sub>	12	H <sub>2</sub>		

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

N3. Néhány folyadék hővezetési tényezője (lásd az N3-T. táblázatot)

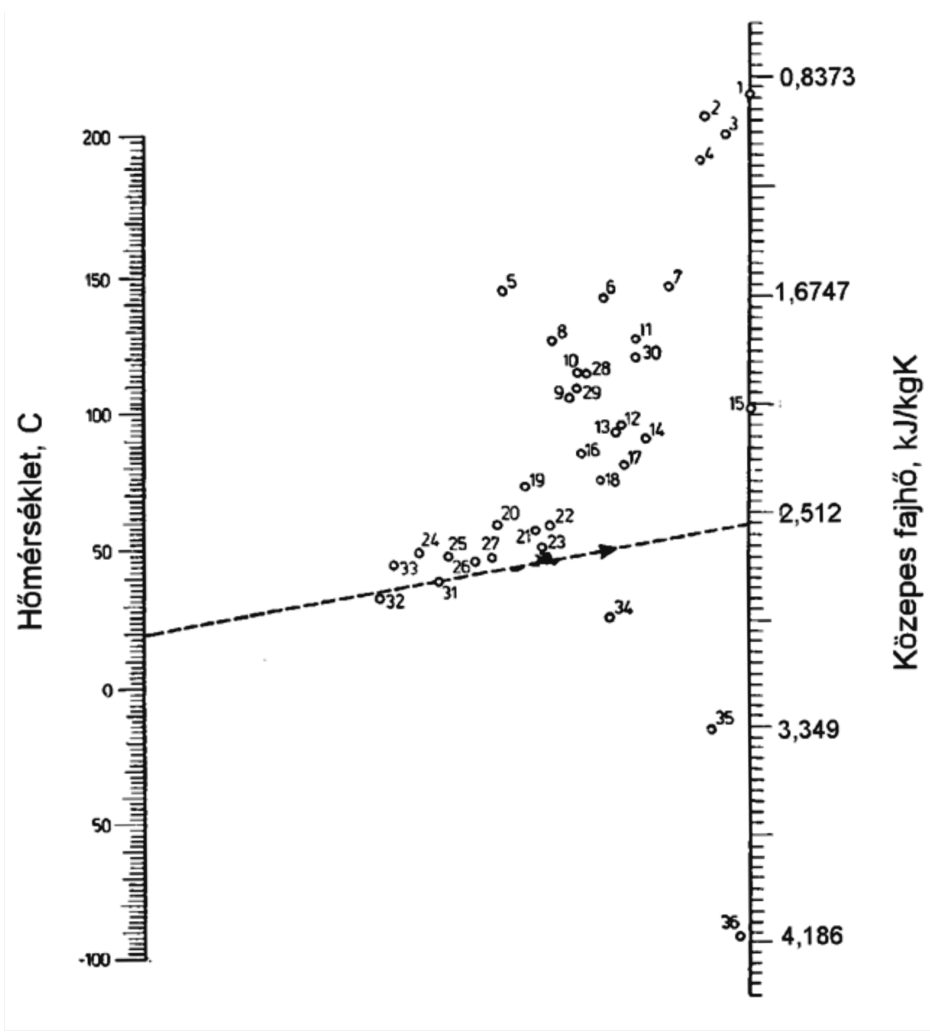


N3-T. táblázat. Az N3 nomogramhoz tartozó folyadékok jegyzéke

Folyadék	Szám	Folyadék	Szám	Folyadék	Szám
NH <sub>4</sub> OH, 26%	31	Ricinusolaj	5	Ecetsav	7
Anilin	6	Petróleum	28	CaCl <sub>2</sub> , 25%	17
Aceton	8	Xilol	14	NaCl, 25%	18
Benzol	11	MetOH	3	CCl <sub>4</sub>	24
Butil-alkohol	9	MetOH, 40%	32	EtOH	4
Vazelinolaj	15	Hangyasav	2	EtOH, 80%	19
Víz	16	Nitro-benzol	10	EtOH, 60%	20
Hexán	26	Oktán	33	EtOH, 40%	21
Glicerín	1	Kénsav, 98%	30	EtOH, 20%	22
Glicerín, 50%	25	Szén-diszulfid	23	Izopropil-alkohl	12
Etil-éter	29	Sósav, 30%	27	Toluol	13

Forrás: Pavlov-Romankov-Noszkov 1972.

N4. A folyadékok közepes/átlagos fajhője (lásd az N4-T. táblázatot)





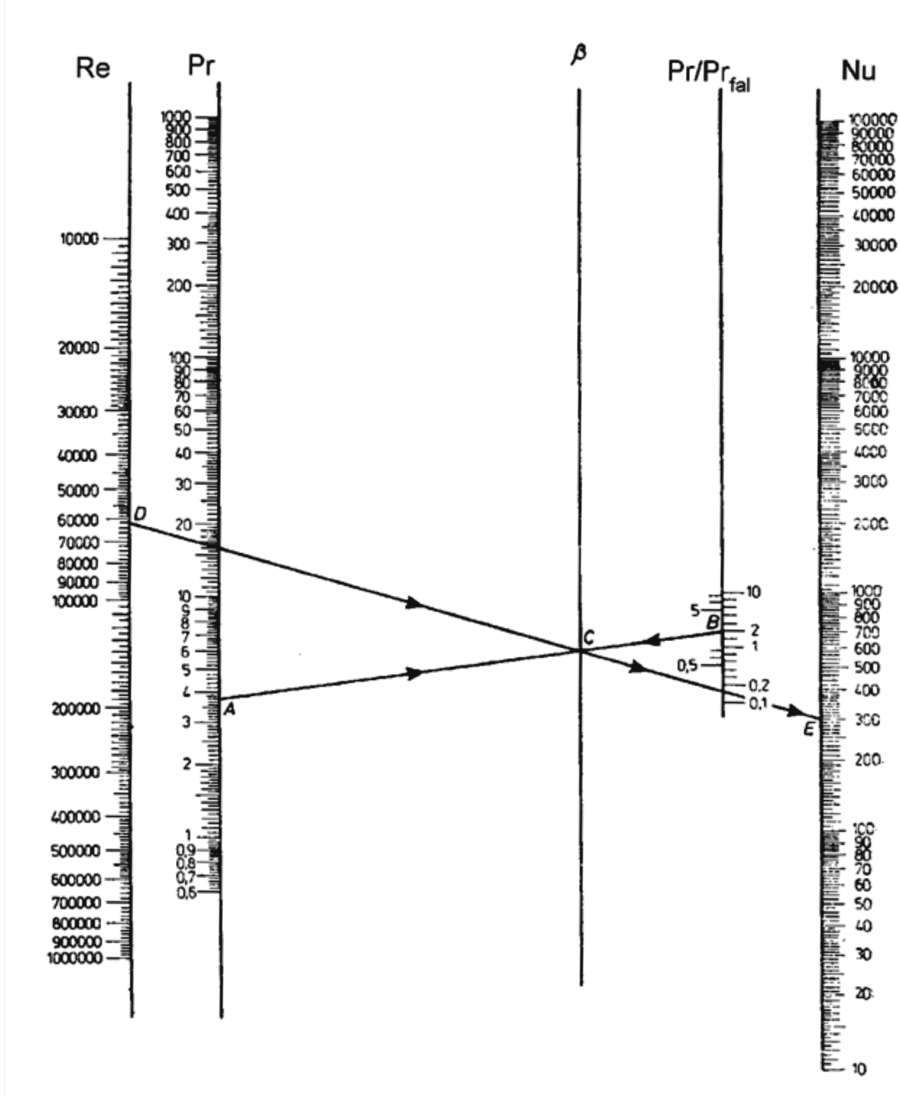
**N4-T. táblázat.** Az N4 nomogram pontjainak megfelelő folyadékok

Folyadék	Sz.	Folyadék	Sz.	Folyadék	Sz.
Amil-acetát	12	Izo-butyl-alkohol	33	CaCl <sub>2</sub> , 25%	34
Anilin	14	Izo-pentán	20	NaCl, 25%	35
Aceton	18	Difenil	8	Etil-klorid	11
Benzol	29	Oktán	15	Kloroform	3
Etil-bromid	1	Propil-alkohol	25	Szén-tetraklorid	2
Butil-alkohol	24	Kénsav	7	Etil-acetát	13
Víz	36	Szén-diszulfid	4	Etilén-glikol	22
Heptán	19	Sósav, 30%	26	Etil-alkohol	31
Glicerín	21	Toluol, 213-313K	28	Metil-alkohol	23
Etil-éter	17	Toluol, 313-373K	30	o- és m-Xilol	9
Etil-jodid	5	Klórbenzol	6	p-Xilol	10
Izopropil-alkohol, 273-323K	32	Izopropil-alkohol, 223-273 K	27		

Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

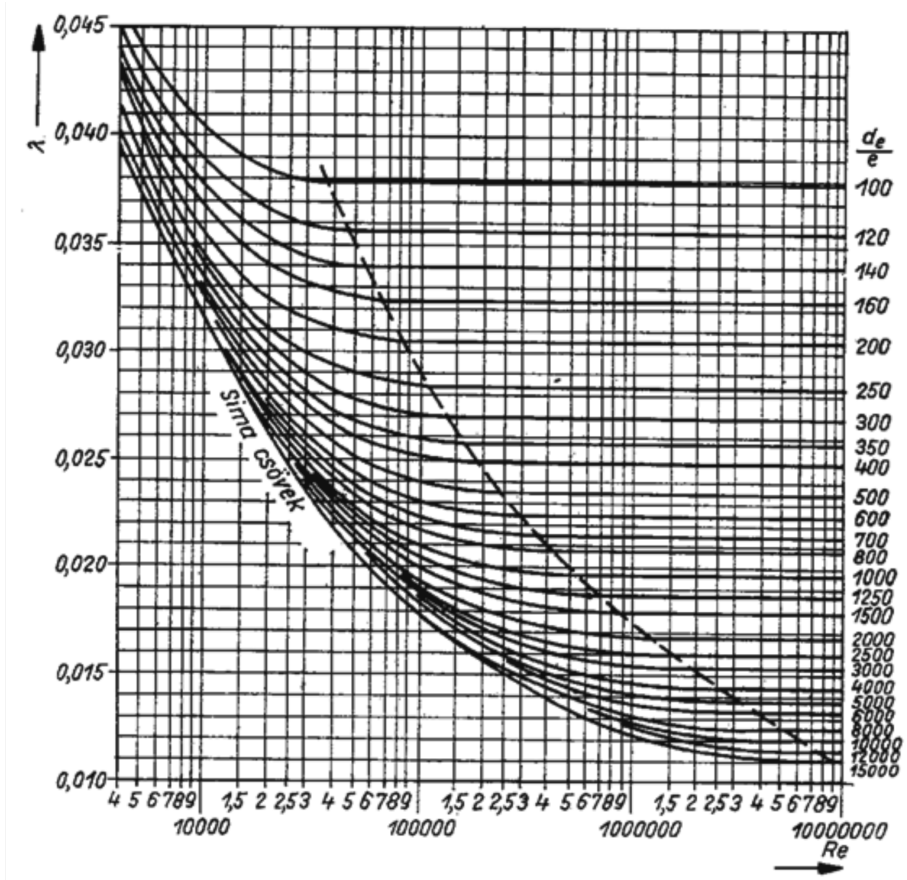
N5. A csövekben fellépő hőátadási tényező meghatározása turbulens áramláskor ( $Re > 10000$ )

(Első lépés AB→C, Második lépés DC→E)



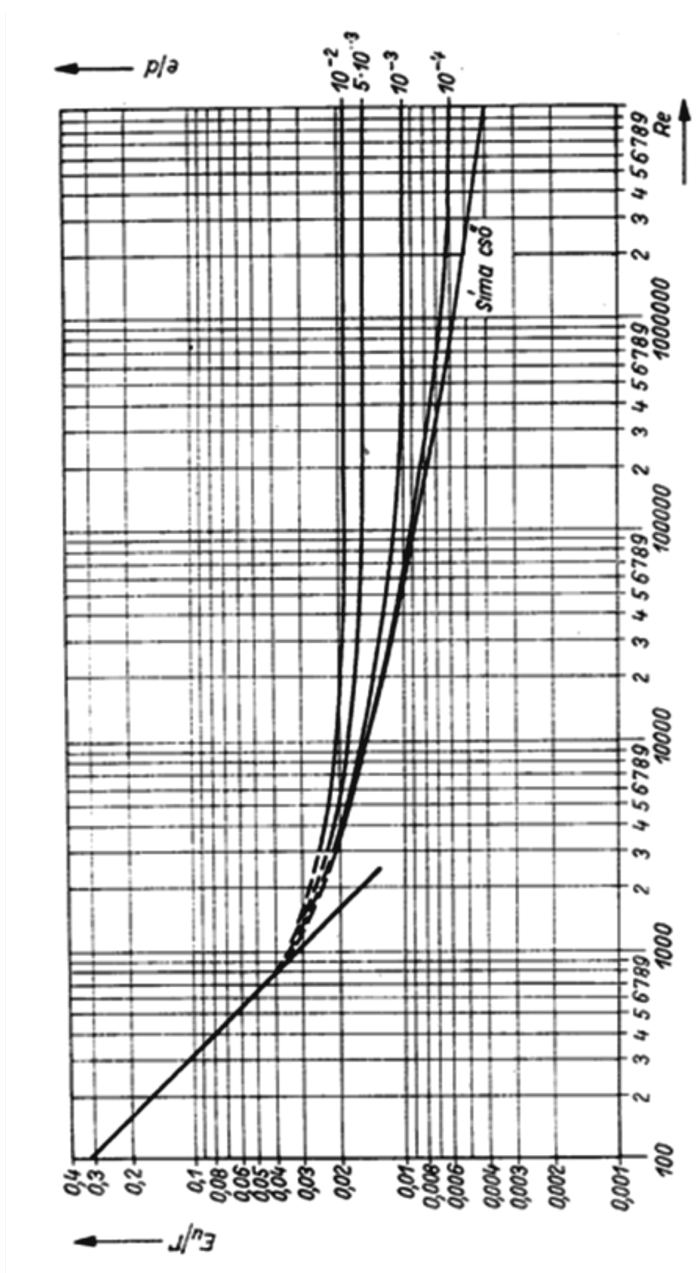
Forrás: Pavlov-Romankov-Noszkov 1972.

N6. A csósúrlódási tényező meghatározása a  $Re$  és a relatív érdesség függvényében

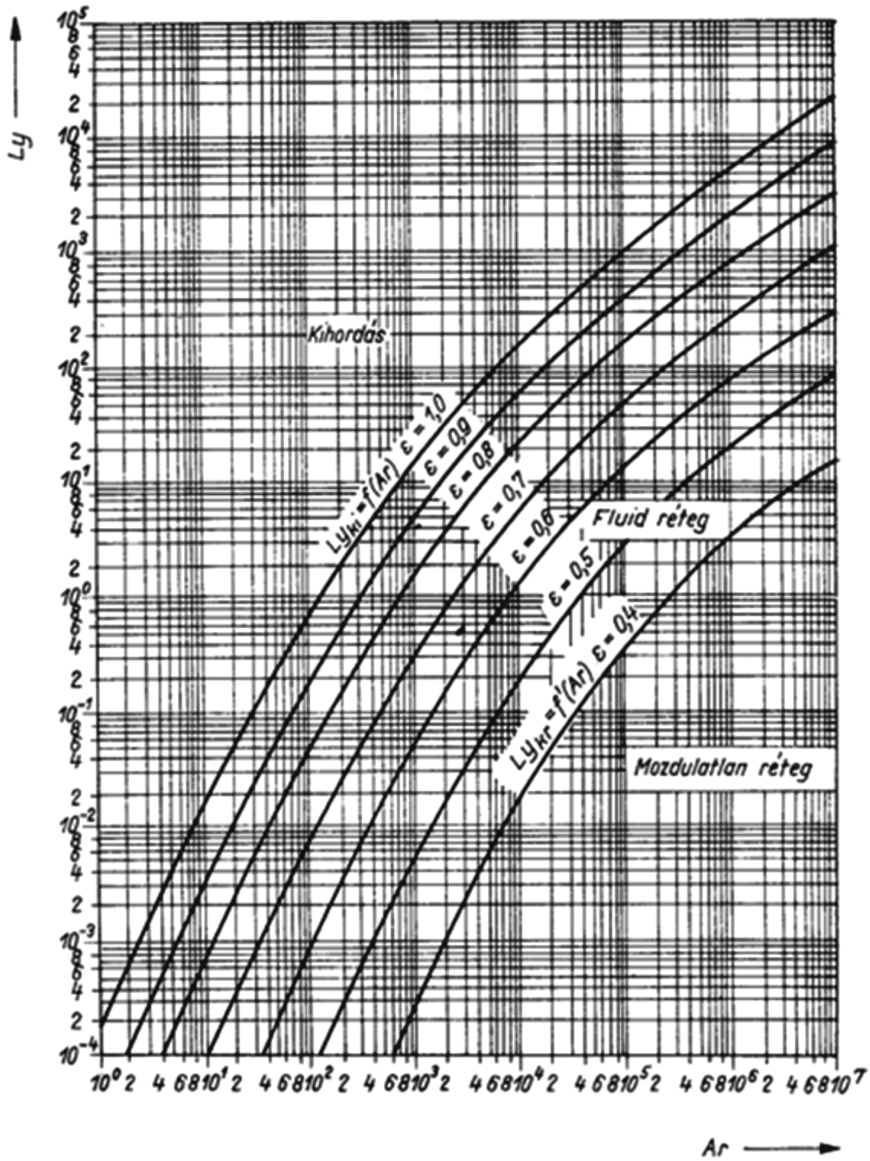


Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

N7. A csőíródási tényező meghatározása  $Re$  függvényében

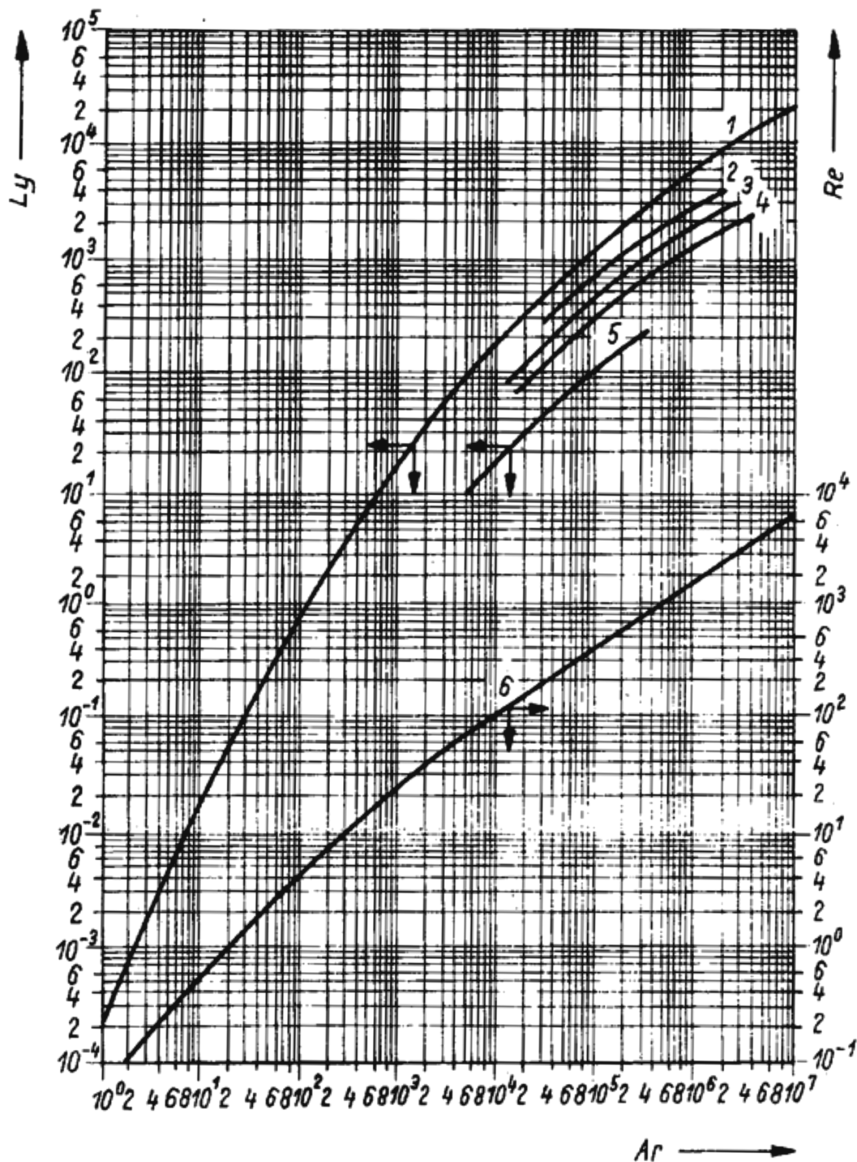


Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

N8. A Liascsenko-szám ( $Ly$ ) és az Arhimédesz-szám ( $Ar$ ) közötti összefüggések

Forrás: Pavlov-Romankov-Noszkov 1972.

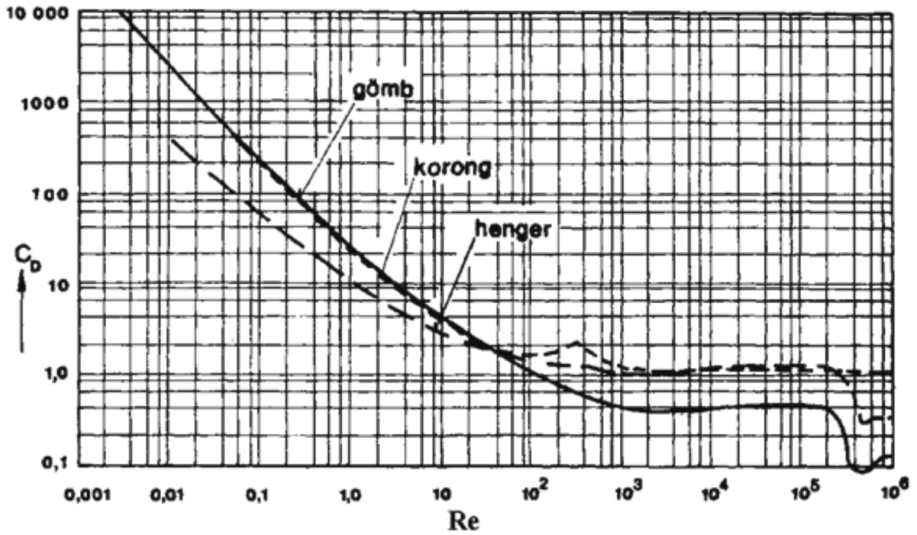
N9. A Liascsenko-szám ( $Ly$ ) és a Reynolds-szám ( $Re$ ) meghatározása az Archimédész-szám ( $Ar$ ) ismeretében különböző részecskék ülepedése esetén



1, 6 – gömb alakú részecskék, 2 – lekerekített részecskék, 3 – szögletes részecskék, 4 – elnyúlt alakú részecskék, 5 – lemezes részecskék

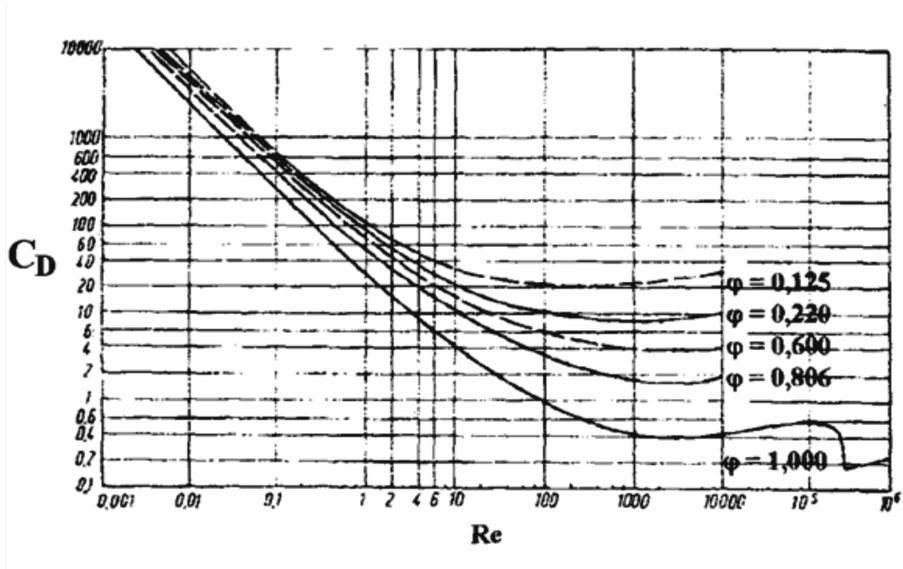
Forrás: Pavlov–Romankov–Noszkov 1972.

N10. A közegellenállási tényező és a  $Re$ -szám közti összefüggés

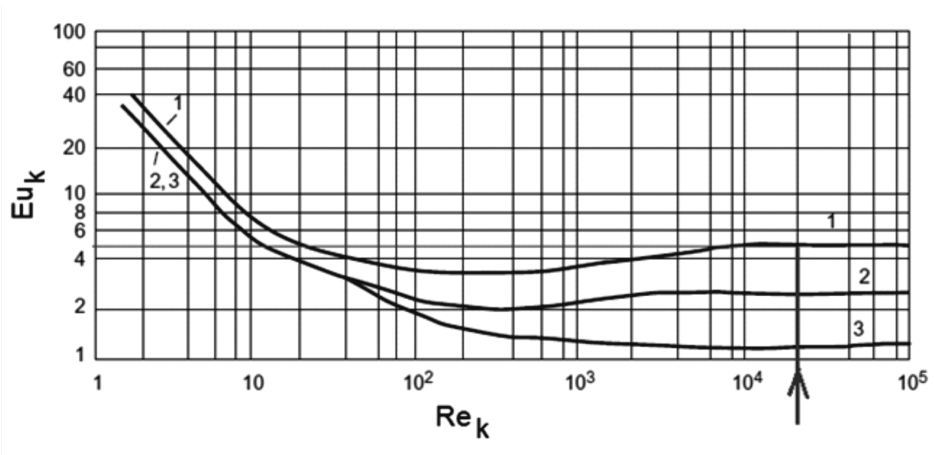


Forrás: Fonyó-Fábrí 2004.

N11. A közegellenállási tényező  $Re$ -szám függése a különböző alaktényező esetén



Forrás: Fonyó-Fábrí 2004.

N12. Az  $Eu_k$ -szám és  $Re_k$ -szám közötti összefüggés Singh után

1 – hatlapátos turbinakeverő, 2 – hatlapátos nyitott turbinakeverő, 3 – hatlapátos 45°-ban dőlt szögű turbinakeverő

Forrás: Singh–Heldman 2009.





# A MELLÉKLETEK ÉS NOMOGRAMOK JEGYZÉKE

---

## Mellékletek

- M1. Néhány szilárd anyag szobahőmérsékleten mért sűrűsége
- M2. Néhány folyadék sűrűsége 293 K hőmérsékleten
- M3. Néhány cseppfolyós anyag fajlagos hőkapacitása különböző hőmérsékleteken,  $J/(kg \cdot K)$
- M4. Néhány gáz fontosabb fizikai tulajdonságai
- M5. Néhány gáz fontosabb fizikai tulajdonságai
- M6. Néhány anyag oldhatósága vízben (g/100 g víz) különböző hőmérsékleteken
- M7. Néhány vizes oldat viszkozitása
- M8. A víz fontosabb tulajdonságai
- M9. A telített vízgőz fontosabb tulajdonságai
- M10. A telített vízgőz és kondenzátum fontosabb tulajdonságai
- M11. A telített víz fontosabb tulajdonságai
- M12. A levegő fontosabb tulajdonságai
- M13. A nátrium-klorid-oldat fontosabb tulajdonságai
- M14. A nátrium-hidroxid-oldat fontosabb tulajdonságai
- M15. A sósav fontosabb tulajdonságai
- M16. Néhány vizes oldat viszkozitása
- M17. Néhány vizes oldat hővezetési tényezője a koncentráció és a hőmérséklet függvényében
- M18. Gázok Henry-állandó értékei a hőmérséklet függvényében
- M19. Néhány vegytiszta anyag fajhője
- M20. Néhány élelmiszer és élelmiszer-alapanyag tulajdonsága
- M21. Élelmiszer-összetevők termodinamikai tulajdonságai
- M22. Néhány hőszigetelő anyag fizikai tulajdonságai
- M23. Ipari berendezésekben alkalmazott acélcsőméretek
- M24. Néhány töltőtest tulajdonsága
- M25. A keverők teljesítményszükségletének meghatározása
- M26. A fluidumok tájékoztató áramlássebesség-értékei
- M27. A súrlódási tényező értéke
- M28. Csövek érdességének átlagos értékei
- M29. Helyi ellenállási tényezők értéke
- M30. A helyi ellenállási tényező értékei néhány csőidom esetében
- M31. A csőfal lerakódásának értéke különböző minőségű közegek esetén
- M32. Dimenziómentes számok jegyzéke
- M33. Dimenziómentes összefüggések lemezes hőcserélők esetén
- M34. Tapasztalati hőátadási tényező értékek

- M35. Megközelítő hőátbocsátási értékek különböző hőcserélők esetében  
M36. Néhány síkmértani alakzat fontosabb jellemzői  
M37. Néhány térmértani alakzat fontosabb jellemzői  
M38. Néhány fontosabb fizikai mennyiség átalakítási összefüggése

## Nomogramok

- N1. A folyadékok dinamikus viszkozitása (lásd az N1-T. táblázatot)  
N2. A gázok dinamikus viszkozitása (lásd az N2-T. táblázatot)  
N1-T. táblázat. Az N1 nomogram pontjainak megfelelő folyadékok  
N2-T. táblázat. Az N2 nomogram pontjainak megfelelő gázok  
N3. Néhány folyadék hővezetési tényezője (lásd az N3-T. táblázatot)  
N3-T. táblázat. Az N3 nomogramhoz tartozó folyadékok jegyzéke  
N4. A folyadékok közepes/átlagos fajhője (lásd az N4-T. táblázatot)  
N4-T. táblázat. Az N4 nomogram pontjainak megfelelő folyadékok  
N5. A csövekben fellépő hőátadási tényező meghatározása turbulens áramláskor  
( $Re > 10000$ )  
N6. A csősúrlódási tényező meghatározása a  $Re$  és a relatív érdesség függvényében  
N7. A csősúrlódási tényező meghatározása  $Re$  függvényében  
N8. A Liascsenko-szám ( $Ly$ ) és az Arhimédész-szám ( $Ar$ ) közötti összefüggések  
N9. A Liascsenko-szám ( $Ly$ ) és a Reynolds-szám ( $Re$ ) meghatározása az Archimédész-szám ( $Ar$ ) ismeretében különböző részecskék ülepedése esetén  
N10. A közegellenállási tényező és a  $Re$ -szám közti összefüggés  
N11. A közegellenállási tényező  $Re$ -szám függése a különböző alaktényező esetén  
N12. Az  $Eu$ -szám és  $Re$ -szám közötti összefüggés Singh után

## ALKALMAZOTT JELÖLÉSEK

---

- $A$  – felület,  $m^2$ ;  
 $A_k$  – áramlási keresztmetszet,  $m^2$ ;  
 $A_L$  – lapátfelület,  $m^2$ ;  
 $a$  – fajlagos felület,  $m^2/m^3$ ;  
 $B$  – instacionárius hőátbocsátásban fellépő állandó,  $B = \frac{T_1 - T_2^0}{T_1 - T_2}$ ;
- $C_o, C_k$  – kezdeti ( $o$ ) (2.6.15), illetve a kritikus ( $k$ ) koncentráció (2.6.17), g/L;  
 $C_D$  – közegellenállási tényező;  
 $C^f, C^e$  – felületi ( $f$ ), illetve egyensúlyi ( $e$ ) koncentráció, mol/L;  
 $C_t$  – hőkapacitás, W/K;  
 $c_p$  – fajlagos hőkapacitás, J/(kg·K);  
 $c_{pk}$  – kondenzátum fajlagos hőkapacitása, J/(kg K);  
 $\Delta C$  – koncentrációváltozás, mol/L;  
 $D$  – csőátmérő, csőkígyó-menetátmérő, m;  
 $D, D_{ef}$  – diffúziós tényező, effektív diffúziós tényező,  $m^2/s$ ;  
 $d$  – kör keresztmetszetű áramcső áramlási átmérője, m;  
 $d_b, d_k$  – kör keresztmetszetű cső belső ( $b$ ), illetve külső ( $k$ ) átmérője, m;  
 $d_e$  – egyenértékű átmérő ( $d_e = 4 \frac{A_k}{N_k}$ ), m;  
– a töltet egyenértékű átmérője (2.5.2), m;  
 $d_p$  – részecskeátmérő, töltetátmérő, m;  
 $F$  – súrlódási erő, N;  
– felület, szűrőfelület,  $m^2$ ;
- $F_{fal}, F_{cs.k.}$  – a fal, illetve a csőkígyó hőátadási felülete,  $m^2$ ;  
 $F_e$  – az ellenállási erő, N;  
 $f$  – súrlódási tényező, Fanning-féle súrlódási tényező;  
 $G$  – az inert gáz mólárama, mol/s (mol/h);  
 $g$  – gravitációs gyorsulási állandó,  $m/s^2$ ;
- $H_k, (H^o), H^o, H_\infty$  – kritikus ( $k$ ), kezdeti ( $o$  vagy  $o$ ), egyensúlyi ( $\infty$ ) szint a hengerben (2.6.14), m;
- $\Delta H_g, \Delta H_{kond}$  – a gőz entalpiája, a gőz kondenzációs entalpiája, J;  
 $h$  – szint, magasság, m;  
 $h_f$  – határfelület jele;  
 $\Delta h$  – szintkülönbség, m;  
 $HTU$  – egységmagasság, m;  
 $I$  – áramerősség, A;  
 $j_A$  – az A komponens áramsűrűsége, mol/( $m^2 \cdot s$ );  
 $j_L, j_g$  – a folyadék, illetve a gáz tömegáram-sűrűsége, kg/( $m^2 \cdot s$ );

- $K, K_{mért}, K_{sz}$  – hőátbocsátási tényező (mért, számított),  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  
 $K_G, K_L$  – a gáz-, illetve a folyadékfázishoz tartozó teljes hajtóerőkre vonatkozó anyagátbocsátási tényezők,  $mol/(m^2 \cdot s)$ ;  
 $K_n, N_k$  – nedvesített kerület, m;  
 $k$  – sebességi együttható (2.6.19);  
 $L$  – a szolvens mólárama,  $mol/s$  vagy  $mol/h$ ;  
 $L_e$  – egyenértékű hosszúság (2.4.1), m;  
 $L_o, L_{FA}$  – a töltet kezdeti ( $o$ ), illetve a fluidizált ágy ( $FA$ ) karakterisztikus mérete (magassága), m;  
 $l$  – karakterisztikus méret, csőhossz, lemez hossz, távolság, töltetmagasság, m;  
 $M_A$  – az A komponens móltömege,  $g/mol$ ;  
 $m, m_o, \Delta m$  – tömeg, kezdeti tömeg, tömegváltozás, kg;  
 $m$  – a szárítandó anyag tömege a nedvességmentes anyagra számítva,  $kg/kg$  száraz anyag;  
 $n, n_A$  – fordulatszám,  $s^{-1}$ ;  
– darabszám (lemez, cső);  
– mólmennyiség, mol;  
 $N_{A,g}, N_{A,l}$  – a két filmben fellépő A komponens árama,  $mol/s$ ;  
 $NTU$  – egységyszám;  
 $P$  – teljesítményszükséglet, W;  
– párlat mennyisége, mol;  
 $p$  – nyomás, Pa;  
 $p_b$  – légköri nyomás, Pa;  
 $p_{Ai}$  – parciális nyomás, Pa;  
 $\Delta p, \Delta p_{mért}, \Delta p_{FA}$  – nyomásveszteség, mért nyomásveszteség, fluidizált ágy nyomásvesztesége (2.5.22), Pa;  
 $\underline{Q}, \underline{Q}_r$  – hőmennyiség, J;  
 $\dot{Q}, \dot{Q}_i, \dot{Q}_V$  – hőáram, hőveszteség (2.8.1), J/s vagy W;  
 $\dot{Q}_{lead}, \dot{Q}_{felv}$  – a leadott, illetve felvett hőáram, W;  
 $q_V, q_k, q_s$  – hőáramsűrűség ( $V$  – vezetési,  $k$  – konvekciós,  $s$  – radiatív vagy sugárzásos),  $W/m^2$ ;  
 $R_h$  – a réteg hidraulikus ellenállása;  
 $R_i$  – az  $i$  réteg hőellenállása (2.7.1),  $K/W$ ;  
 $R_m$  – membránellenállás (3.2.6);  
 $Re, Re_p, Re_k$  – Reynolds-szám, részecskére vonatkoztatott Reynolds-szám, kevéreési Reynolds-szám;  
 $r_L$  – lepényellenállás (3.2.2);  
 $S$  – a körüláramlott test mozgási irányára merőleges felülete,  $m^2$ ;  
 $T, t$  – hőmérséklet, K, illetve  $^{\circ}C$ ;  
 $\Delta T_N, \Delta T_k$  – a végeken mért hőmérséklet-megközelítés,  $N$  – nagy,  $k$  – kicsi, K;  
 $\Delta T_a$  – átlagos (logaritmikus) hőmérséklet-különbség,  $^{\circ}C$  vagy K;

- $U$  – feszültség, V;
- $V, V_p, V_H, V_{\text{át}}, V_f, V_k$  – térfogat, folyadék ( $\text{}$ ) térfogat, hengerben mért ( $\text{}$ ) térfogat, átlag ( $\text{}$ ) térfogat, a mérés végső ( $\text{}$ ) térfogata, a mérés kezdeti ( $\text{}$ ) térfogata,  $\text{m}^3$ ;
- $V_{\tau}$  – térfogatáram,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;
- $V^{\text{moláris}}$  – a mérési körülményeken számított moltérfogat, L/mol;
- $V^{\text{levegő}}$  – mért levegő átlagos térfogatárama, L/h;
- $V^{\text{víz}}$  – a víz térfogatárama, L/h;
- $v_L$  – a lapát közepes kerületi sebessége, m/s;
- $w, w_k, w_f, w_{\text{max}}$  – áramlási sebesség, kritikus áramlási sebesség (2.5.23), (2.5.24), kerületi sebesség ( $2\pi Rn$ ), maximális sebesség, m/s;
- $w_1, w_2, w_k, w_e$  – a kezdeti ( $\text{}$ ), a végső ( $\text{}$ ), a kritikus ( $\text{}$ ), illetve az egyensúlyi ( $\text{}$ ) nedvességtartalom, kg/kg száraz anyag;
- $X$  – az oldat koncentrációja mólarányban kifejezve, mol komponens/mol inert;
- $X_A$  – az A komponens tömegtörtje, kg A/kg oldat (3.10.8);
- $x_A^*$  – az  $x_A$  folyadékfázisú koncentrációnak megfelelő egyensúlyi koncentráció, mol/mol;
- $Y$  – a gáz koncentrációja mólarányban kifejezve, mol komponens/mol inert;
- $y_A^*$  – az  $y_A$  gázfázisú koncentrációnak megfelelő egyensúlyi koncentráció, mol/mol;
- $y, (y_A), x, (x_A)$  – gáz, illetve az oldat koncentrációja móltörtben kifejezve (A komponensre viszonyítva), mol komponens /mol oldat;
- $Z$  – töltetmagasság, m.

## Görög betűk

- $\alpha$  – relatív illékonyság;
- $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$  – konvekciós hőátadási tényező,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;
- $\alpha_m$  – átfolyási szám (2.3.12), (2.3.17.);
- $\beta$  – kompresszibilitási tényező (2.3.3);
- $\beta_g, \beta_l$  – komponensátadási tényező ( $g$  – gáz oldali filmben,  $l$  – oldat oldali filmben), m/s;
- $\delta, \delta_{\text{fal}}$  – rétegvastagság, filmvastagság, falvastagság, m;
- $\varepsilon$  – hézagtérfogat, porozitás,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ; emissziós állandó;
- $\varepsilon_{\sigma}, \varepsilon_{FA}$  – a töltet kezdeti, illetve a fluidizált ágy porozitása,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;
- $\zeta$  – helyi ellenállás (2.4.5);
- $\eta, \eta_{fl}$  – a közeg, illetve a fluid közeg dinamikus viszkozitása, Pa·s;
- $\eta_l, \eta_g$  – a folyadék, illetve a gáz viszkozitása, Pa·s;
- $\lambda$  – hővezetési tényező,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; elektromos vezetési tényező, S; csőszűrődási tényező (Darcy–Weisbach-féle);

- $\nu$  – kinematikus viszkozitás,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  
 $\rho, \rho_m$  – sűrűség, manométer folyadéksűrűsége (2.3.16),  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $\rho_p, \rho_R, \rho_\beta$  – részecske, illetve a fluidum sűrűsége (2.5.15),  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $\rho_L, \rho_g$  – a folyadék, illetve a gáz sűrűsége,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $\sigma$  – az abszolút fekete test sugárzási állandója,  $5,676 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  
 $\tau$  – idő, s;  
 $\tau_{sz}, \tau_a$  – a szűrés, illetve az állás ideje, s;  
 $\Phi$  – alaktényező;  
 $\omega$  – szögsebesség ( $2\pi n$ ),  $\text{s}^{-1}$ .

## FELHASZNÁLT IRODALOM

---

XXX

1982 *Sistemul internațional de unități*. București, Editura Didactică și Pedagogică.

XXX

2000 *Vegyipari műveleti laboratóriumi gyakorlatok*. Veszprém, Veszprémi Egyetemi Kiadó.

BRATU, Emilian

1984a *Operații și utilaje în ingineria chimică*, vol. I. București, Editura Tehnică.

1984b *Operații și utilaje în ingineria chimică*, vol. II. București, Editura Tehnică.

1984c *Operații și utilaje în ingineria chimică*, vol. III. București, Editura Tehnică.

CHHABRA, Raj–SHANKAR, V. (eds.)

2018a *Coulson and Richardson's Chemical Engineering Vol. 1A: Fluid Flow: Fundamentals and Applications*, 7<sup>th</sup> Ed. Oxford, Elsevier Butterworth-Heinemann.

CHHABRA, Raj–SHANKAR, V. (eds.)

2018b *Coulson and Richardson's Chemical Engineering Vol. 1B: Heat Transfer and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 7<sup>th</sup> Ed. Oxford, Elsevier Butterworth-Heinemann.

CHOI, Y.–OKOS, Martin, R.

1986 Effects of Temperature and Composition on the Thermal Properties of Foods. *Food Engineering and Process Applications* 1. 93–101.

CRISTIAN, Gheorghe–HOROBA, Eugen–MUREȘAN, Emil

2005 *Proiectarea reactoarelor chimice*. Iași, Editura Performantica.

DOMONKOS László (szerk.)

2000 *Fizikai kémiai laboratóriumi gyakorlatok*. Veszprém, Veszprémi Egyetemi Kiadó.

FONYÓ Zsolt–FÁBRI György

2004 *Vegyipari művelettani alapismeretek*. Budapest, Nemzeti Tankönyvkiadó.

GAVRILĂ, Lucian–ZICHIL, Valentin

2000 *Fenomene de transfer*. Chișinău, Editura Tehnică Info.

GAVRILĂ, Lucian

2002 *Operații hidrodinamice*. Chișinău, Editura Cartea de Știință.

GREEN, Don, W.–PERRY, Robert, H. (eds.)

2008 *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. New York, McGraw-Hill Book Co.

HARJA, Maria et alii

2013 *Ingineria produselor anorganice, Săruri anorganice, Îndrumar de laborator*. Iași, Editura Ecozone.



- HELDMANN, Dennis, R.–LUND, Daril, B.  
2007 *Handbook of Food Engineering*. New York, CRC Press.
- HOROBA, Liliana  
2001 *Operații termice*. Iași, Editura Corson.
- IAKIMENKO, L. M.–PASMNIK, M. J.  
1976 *Sprovocsnik po proizvodstvo khloro*. Moskva, Himia Izdatelstvo.
- MACOVEI, Viorica, M.  
2001 *Calcul de operații și utilaje pentru procesarea termică și biochimică în biotehnologie*. Galați, Editura Alma.
- MĂMĂLIGĂ, I.–PETRESCU, S.  
2004 *Operații de transfer de masă*. Iași, Editura Cermi.
- NENIȚESCU, Costin (ed.)  
1952 *Manualul inginerului chimist*. București, Editura Tehnică.
- NÉMETH Béla  
1971 *Kémiai táblázatok*. Budapest, Műszaki Könyvkiadó.
- ONIȚĂ, Nicolae–IVAN, Elisabeta  
2006 *Memorator pentru calcule în industria alimentară*. Timișoara, Editura Mirton.
- PAVLOV, Konstantin, F.–ROMANKOV, Piotr, G.–NOSZKOV, Anatoli, A.  
1972 *Vegyipari műveletek és készülékek számítása*. Budapest, Műszaki Könyvkiadó.
- SINGH, Paul, R.–HELDMAN, Dennis, R.  
2009 *Introduction to Food Engineering*. Fourth Edition, Amsterdam, Academic Press.
- STOICA, Anicuta et alii  
2007 *Operații termice în industria alimentară*. București, Editura Politehnica Press.
- SZÉP Alexandru–GAVRILĂ, Lucian–ANDRÁS Csaba, D.  
2012 *Transzportfolyamatok és művelettan I. Transzportfolyamatok*. Iași, Editura Cermi.
- SZÉP Alexandru–MOLNOS Éva–ANDRÁS Csaba, D.  
2017 *Transzportfolyamatok és művelettan II. Művelettan*. Iași, Editura Cermi.
- SZOLCSÁNYI Pál–SZÁNYA Tibor  
1998 *Vegyipari műveletek I*. Veszprém, Veszprémi Egyetemi Kiadó.
- TUDOSE, Radu, Z. et alii  
2001 *Fenomene de transfer și operații unitare. Îndrumar pentru lucrări de laborator*. Iași, Rotaprint U.T. Iași.
- TUDOSE, Radu, Z.  
2000 *Ingenieria proceselor fizice din industria chimică*, vol I. București, Editura Academiei.

# ABSTRACT

---

## **Process phenomena and unit operations. Laboratory guide**

The experimental results from direct measurements, performed at laboratory, pilot or industrial scale, in addition to physics laws and modelling, are successfully used in solving engineering problems. Since the lack of accuracy in experiments could cause erroneous conclusions based on the obtained data, an increased importance for investigation methods should be accorded. This laboratory work manual contains both the theoretical information needed to design and perform measurements and the methodology of data processing.

The description of laboratory experiment has a theoretical part, where the physical basics are presented, followed by the definition of the objectives. Furthermore, the experimental equipment and its operation are described, and, finally, the experimental data processing and the result representing modalities are showed.

Structurally, the guide contains three chapters and large Appendices parts. The first one, *General Aspects*, contains the presentation of the main physical quantities and the corresponding dimensional equations (in SI) important for the discipline. The general problems of measurements, the representation modalities of the primary results as well as the basic data processing methods are also presented. Nevertheless, the requirements for experiment reports and the main Occupational Safety and Health (OSH) rules for laboratory work are also included.

The following chapter was focused on the laboratory practices in Transport Phenomena. The *Hydrodynamic Measurements* is dedicated to the experimental determination of characteristic hydrodynamic quantities. The main lab works from this section are: experimental determinations of the flow type (Reynolds number), of the pipe friction factor and the coefficient of local resistance, calibration of the pressure diaphragm flow meter and rheometer, and measurement of suspensions settling velocity.

The *Applications of Heat Transfer* discusses some measurements in the field of heat transfer. The main titles are: the analogue hydrodynamic modelling of heat transfer, the study of the condensation heat transport coefficient.

Chapter two concludes with lab works in the field of *Mass Transport*. Here are presented measurements of the diffusion coefficients in solutions and through membrane as well as the experimental study of the absorption in falling-film column.

Chapter three is dedicated to the laboratory works related to various *Unit Operations*, namely *hydrodynamics* (study of mechanical stirrer's efficiency, determination of filtration constants), *heat exchange* (determination of overall heat transfer coefficient, of hellicoidal, shell and tube heat exchangers and plate heat exchangers), and *separation processes* (study of the absorption process in packed columns, of the drying kinetics of wet solids, of component separation by batch distillation, and of the salting out process).

This laboratory guide is completed with a series of appendices, containing material property tables, charts, formulas, and usual nomograms, recommended in the bibliography, which provide useful data and information for the processing of experimental data and for writing of the laboratory reports.

The guide, in principle, is elaborated for internal use for Sapientia University BSc students of food, environmental and biotechnology engineering, valorizing the experience of established schools both in the field of chemical (Iași, Bucharest, Veszprém, Budapest) and food engineering (Galați, Bacău).

# REZUMAT

---

## Fenomene de transfer și operații unitare. Îndrumar de laborator

În rezolvarea multor probleme ingineresti pe lângă legile fizicii se utilizează cu succes rezultatele unor măsurători directe, efectuate la scară de laborator, pilot sau în instalații industriale. Deoarece în lipsa acurateții în obținerea datelor, concluziile bazate pe rezultate pot fi eronate, trebuie acordată importanța cuvenită metodelor de investigare. Prezentul îndrumar conține atât informațiile teoretice necesare proiectării și efectuării măsurătorilor, cât și sfaturile necesare prelucrării datelor. Fiecare lucrare are în componență o parte teoretică, unde se definesc noțiunile de bază, apoi sunt definite obiectivele, se descriu instalația experimentală, modul de lucru și, în final, se prezintă modul de prelucrare a informațiilor și de prezentare a rezultatelor.

Structural, îndrumarul conține trei capitole și Anexe. Primul capitol, *Cunoștințe generale*, conține prezentarea mărimilor fizice cu care operează disciplina, ecuațiile dimensionale corespunzătoare și sistemul internațional de unități. Tot aici se prezintă problematica generală a efectuării măsurătorilor, a prezentării rezultatelor primare, a modului de efectuare a calculelor. Aici se fac referiri la modul de întocmire a raportului lucrării și, bineînțeles, cele mai importante măsuri de protecția muncii.

Următorul capitol este consacrat tematicii Fenomenelor de transfer. În prima parte sunt prezentate lucrările experimentale pentru determinarea unor *mărimi hidrodinamice caracteristice*, cele mai importante lucrări fiind: determinarea experimentală a caracterului curgerii (determinarea numărului Reynolds), determinarea experimentală a coeficientului de frecare la perete, etalonarea difragmei și a reometrului, determinarea experimentală a rezistențelor locale, a vitezei de sedimentare.

În continuare sunt prezentate aplicații ale *transferului de căldură*, destinat lucrărilor din domeniul transferului termic, cele mai reprezentative lucrări fiind: modelarea hidrodinamică a transferului de căldură, determinarea experimentală a coeficientului parțial de transfer termic la condensare.

Lucrările de laborator din domeniul *Transferului de component* întregesc problematica fenomenelor de transfer. Aici sunt prezentate lucrările consacrate determinării experimentale a coeficienților de difuzie în soluții și prin membrană, ca și studiul experimental al absorbției în coloane cu curgere peliculară.

Capitolul trei este consacrat lucrărilor de laborator caracteristice diferitelor *operații unitare*, cum sunt cele *hidrodinamice* (determinarea experimentală a efi-

cienței agitatoarelor mecanice, a constantelor filtrării), *termice* (studiul transferului termic în regim nestaționar, studiul transferului termic în regim staționar în schimbătoare de căldură țevă în țevă, multitubulare și cu plăci) și de *transport de masă* (studiul procesului de absorbție în coloane cu umplură, studiul cineticii procesului de uscare a solidelor, studiul separării prin distilare simplă, studiul experimental al procesului de salifiere).

Îndrumarul de laborator este completat de o serie de tabele, diagrame, formule și nomograme uzuale, recomandate în bibliografie, care furnizează informațiile utile pentru calculele din cadrul fiecărei lucrări.

Îndrumarul elaborat pentru uzul cursanților de la specializările ingineresti din cadrul Facultății de Științe economice, socio-umane și ingineresti – Miercurea Ciuc a Universității Sapiența valorifică experiența unor școli consacrate din domeniul ingineriei chimice (Iași, București, Veszprém, Budapesta) și alimentare (Galați și Bacău).

## A SZERZŐKRŐL

---

Dr. *András Csaba Dezső* egyetemi adjunktus, okleveles vegyészmérnök a szerves kémiai technológia területén. Tudományos fokozatát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem keretében működő Oláh György Doktori Iskolában szerezte bioaktív élelmiszer-hatóanyagok kinyerése fűszer- és gyógynövényekből szuperkritikus fluid extrakció alkalmazásával témakörben. A Iași-i Gh. Asachi Műszaki Egyetem elvégzése után a BME Doktori Iskolájában folytatta tanulmányait, majd a Richter Gedeon kutatói ösztöndíj után a Sapientia EMTE Csíkszeredai Karának tanársegéde és jelenleg adjunktusa. Tudományos érdeklődése szerteágazó, kezdve a bioaktív anyagok hatásmechanizmusától, egészen azok laboratóriumi és ipari kinyeréséig. Kutatói és oktatói tevékenysége főleg a hatóanyagok kinyerésére irányul, új módszerek, illetve laboratóriumi eszközök kifejlesztésében vállalva szerepet. Az alapképzésben a *transzportfolyamatok és művelettan*, illetve a *reaktorok és bioreaktorok* tárgyak elméleti és gyakorlati foglalkozásainak az oktatója. Társszerzője a *Transzportfolyamatok és művelettan* jegyzeteknek és az *Élelmiszeripari technológiai számítások III.* útmutatónak. Oktatási és laborfejlesztési tapasztalatát jelen útmutató tartalmazza.

Dr. *Molnos Éva* egyetemi adjunktus, okleveles vegyészmérnök az élelmiszeripari technológia területén. Tudományos fokozatát a Bukaresti Műszaki Egyetem Alkalmazott Kémia és Anyagtudományi Karának doktori iskolájában szerezte vegyészmérnöki tudományokban. A PhD-fokozat megszerzése óta a Sapientia EMTE Csíkszeredai Karán adjunktusi beosztásban dolgozik. Tudományos érdeklődése az élelmiszer-tudomány és élelmiszer-előállítás. Oktatói tevékenysége főként az *élelmiszeripari transzportfolyamatok és művelettan*, az *általános élelmiszeripari technológia*, valamint a *mezőgazdasági termékek minősége és feldolgozása* tantárgyak elméleti és gyakorlati foglalkozásaira összpontosul. A *Transzportfolyamatok és művelettan II.* jegyzet társszerzője.

Dr. *Szép Alexandru* egyetemi tanár, okleveles vegyészmérnök, a szerves kémiai technológia területén szerzett tudományos címet. Tudományos és oktatói munkásságát a vegyészmérnöki tudományok területén végezte eleinte a Iași-i Műszaki Főiskola keretében, majd a 2006/2007-es tanévtől a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetemen. Oktatói tapasztalatait több jegyzet, laboratóriumi és tervezési útmutató tükrözi mind a szerves sók technológiája, mind a nehéz vegyipari technológiák (klór-alkáli, szóda és mész technológia) területén. A Sapientia EMTE-n a vegyészmérnöki (és rokonipari) tudományok néhány alaptárgyát oktatta, éspedig a *transzportfolyamatok és művelettan*, *általános kémiai technológia*, *technológiai folyamatok elemzése és szintézise*, illetve a *fizikai-kémia fonto-*

*sabb fejezetei.* Fontos szerepe volt az élelmiszer- és környezetipari mérnökképzés területén a technológiai terv és diplomamunka tárgyak tartalmi és módszertani megfogalmazásában és fejlesztésében. E téren megjelentetett *Élelmiszeripari technológiai számítások I–III.* és *Diplomadolgozat készítési útmutató* jelenti a hallgatók záróvizsgadolgozat-készítésében a legfontosabb támaszt.





**Scientia Kiadó**

400112 Kolozsvár (Cluj-Napoca)  
Mátyás király (Matei Corvin) u. 4. sz.  
Tel./ fax: +40-364-401454  
E-mail: [scientia@kpi.sapientia.ro](mailto:scientia@kpi.sapientia.ro)  
[www.scientiakiado.ro](http://www.scientiakiado.ro)

**Korrektúra:**

Szenkovics Enikő

**Műszaki szerkesztés:**

Dobos Piroska

**Tipográfia:**

Könczey Elemér

**Nyomdai munkálatok:**

F&F INTERNATIONAL Kft.  
Felelős vezető: Ambrus Enikő igazgató

A mérnöki szemlélet kialakításában az elméleti alapok, valamint a gyakorlati ismeretek egyaránt fontos szerepet játszanak. A jegyzet tartalmi felépítése és szerkezete igazodik a *Transzportfolyamatok és Művelettan* tárgyakhoz, elősegítve az elméleti órák ismeretanyagának megértését és elmélyítését. Ezek az ismeretek lehetővé teszik a hallgatók számára a tényleges technológiai folyamat műveletorientált elemzését az adatgyűjtéstől a mérlegeken keresztül a készülék-méretek technológiai meghatározásáig. Valamennyi laborgyakorlat leírása tartalmazza a gyakorlat célját, az elméleti alapokat, a gyakorlati berendezést, a mérés és az adatgyűjtés menetét, valamint az adatok feldolgozásának és kiértékelésének eljárásait.

ISBN 978-606-975-035-3



9 786069 750353