

## 9.2. Tartózkodási idő eloszlás mérése kamrás reaktorban és töltött oszlopban

### 9.2.1. Bevezetés

A vegyipari berendezésekben az anyagok meghatározott hatásoknak (hőmérséklet, nyomás, fizikai és kémiai hatás) vannak kitéve. A különböző folyamatoknál lényeges, hogy ez a hatás mennyi ideig tart. Sok esetben a jó keveredés hátrányos, pl. a tej sterilizálásánál a csírák elpusztításához megfelelően magas hőmérsékletet kell elérni, de a tej csak rövid ideig lehet ezen a hőmérsékleten, hogy az értékes hatóanyagok (vitaminok) ne menjenek tönkre. Tehát gyors felmelegítést, rövid ideig tartó magas hőmérsékletű sterilizálást és gyors lehűtést kell elérni.

Ha a sterilizálást keverős tartályban folyamatos üzemben akarnánk végezni, akkor az eredmény nem lenne kielégítő. Éppen a jó keveredés miatt a bevezetett folyadék egy része rögtön, azaz sterilizálás nélkül távozna a készülékből, más részei viszont a kívánatosnál hosszabb ideig tartózkodnának a készülékben magas hőmérsékleten, ezalatt a vitaminok károsodnának. Mint látható, a keverős tartály folyamatos üzemben nem használható, ha az anyag csak meghatározott ideig tartózkodhat a készülékben magas hőmérsékleten.

Szakaszos üzemeltetésnél ez a probléma nem jelentkezik, mivel ekkor minden részecske tartózkodási ideje ugyanakkora.

A legtöbb esetben egy egységes tartózkodási idő lenne a kedvező, amikor is az anyag minden részecskéje, térfogateleme egyenlő sebességgel, ugyanolyan hosszú úton haladna át a készüléken (ez dugattyúszerű áramlásnál teljesül) és az áthaladás során az egymás után haladó fluidumelemek nem keverednének egymással. Ezt az ideális áramlási esetet **tökéletes kiszorításnak** nevezzük.

### 9.2.2. Elméleti összefoglaló

#### *Közepes tartózkodási idő*

Stacionáriusan működő berendezésnél a közepes tartózkodási idő a következő összefüggés alapján számítható:

$$\bar{t} = \frac{m}{\dot{m}} \quad (9.2-1)$$

ahol  $m$  a készülékben levő anyag tömege (kg),  $\dot{m}$  a készülékbe időegység alatt betáplált anyag tömege (tömegáram: kg/s). Ha a berendezésben az anyag sűrűsége nem változik, akkor a fenti képlet alapján:

$$\bar{t} = \frac{V}{\dot{V}} \quad (9.2-2)$$

ahol  $V$  a készülékben levő anyag térfogata ( $\text{m}^3$ ),  $\dot{V}$  térfogatáram ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Folyamatos üzemeltetésű berendezésben a betáplált anyag egyes részecskéinek tartózkodási ideje nagyon különböző lehet és, hogy egy adott részecske tartózkodási ideje mekkora, az a véletlentől függ. Csak azt tudjuk megmondani, hogy mekkora a valószínűsége annak, hogy a  $t$  tartózkodási idő valamilyen megadott határok közé fog esni.

#### *A tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok célja*

A cél a vegyipari berendezésekben kialakuló valóságos áramlási és makrokeveredési viszonyok, a hő- és komponens-átadás matematikai modellekkel történő leírása. A matematikai modell segítségével számítani tudjuk anyagátadó berendezéseknél az elérhető szétválasztást, reaktoroknál a konverziót. Ismervé a tartózkodási idő eloszlás és a matematikai modell paramétereinek változását az üzemeltetési körülmények függvényében meghatározhatók az optimális üzemeltetési viszonyok, és tanulmányozható a matematikai modell alapján a szabályozóval összekapcsolt berendezés dinamikus viselkedése.

A modell kiválasztásánál fontos szempont, hogy az minden lényeges hidrodinamikai folyamat matematikai leírását tartalmazza, de az egyenlet lehetőleg egyszerű és a kísérleti úton meghatározandó paraméterek száma csekély legyen.

Ha a készülék nem megfelelően működik, rossz a szétválasztás, kicsi a konverzió, akkor a tartózkodási idő eloszlás mérés segítséget nyújt a hibás működés okainak felderítésében. A tartózkodási idő eloszlás vizsgálattal kimutatható a készülékben a csatorna (rövidzár), a főárammal rosszul keveredő holt-tér, és belső recirkuláció.

A tartózkodási idő eloszlás leírására az  $E(t)$  sűrűség- és az  $F(t)$  eloszlásfüggvény szolgál.

#### *A tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvény $E(t)$*

A készüléket elhagyó anyagáramnak az a törtrésze, amely  $t'$  és  $t' + dt$  intervallumba eső ideig tartózkodott a készülékben  $E(t')$   $dt$ -vel egyenlő (9.2-1a. ábra). A sűrűségfüggvény 0-tól  $\infty$ -ig vett integrálja egy.

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad (9.2-3)$$

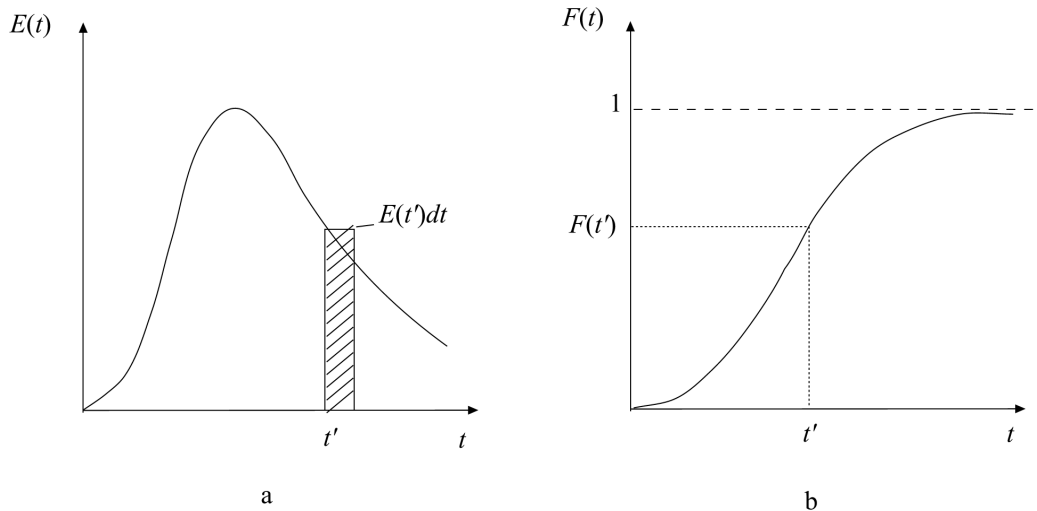
Az  $E(t)$  függvény definíciójából következik, hogy dimenziója  $[1/\text{idő}]$ . Ha megszorozzuk az  $E(t)$  függvényt a közepes tartózkodási idővel, akkor a dimenzió nélküli alakot kapjuk:

$$E(\vartheta) = \bar{t} E(t) \quad (9.2-4)$$

ahol  $\vartheta = t/\bar{t}$  a közepes tartózkodási időre vonatkoztatott relatív idő.

#### *Tartózkodási idő eloszlásfüggvény $F(t)$*

Az  $F(t)$  eloszlásfüggvénynek valamely  $t'$  időponthoz tartozó értéke megadja a kilépő anyagáramnak azon hányadát, amely  $t'$  vagy annál rövidebb időt töltött a készülékben (9.2-1b. ábra).



9.2-1. ábra. Tartózkodási idő eloszlás: a) sűrűségfüggvény; b) eloszlásfüggvény

Az eloszlásfüggvény a sűrűségfüggvénynek 0-tól  $t'$ -ig vett integráljával egyenlő.

$$F(t') = \int_0^{t'} E(t) dt \quad (9.2-5)$$

Ebből következik, hogy az eloszlásfüggvény  $t$ -vel mindig nő és határértékben egyhez tart, ha  $t \rightarrow \infty$ .

#### *Tartózkodási idő eloszlás mérése*

A tartózkodási idő eloszlását nyomjelzéses kísérlettel határozzuk meg. Nyomjelzőként olyan vegyületet választunk, amely kielégíti a következő követelményeket: csak a vizsgált fázisban oldódjon, az áramlást ne zavarja, a rendszeren változatlanul haladjon át (azaz ne reagáljon a készülékben lévő anyaggal, ne kötődjön meg), áramlástanilag a környező fázis részecskéihez hasonlóan viselkedjen és koncentrációja könnyen mérhető legyen.

A tartózkodási idő eloszlás meghatározására szolgáló módszerek lényege, hogy a stacionáriusan működő berendezés elején a betáplálási áramban koncentráció zavarást hozunk létre és a rendszert elhagyó áramban mérjük a válaszjelet. A készülékhez csatlakozó betápláló és anyagelvezető csővezetékekben csak konvektív anyagtranszporttal kell számolnunk, mivel a csővezetékekben az áramlási sebesség lényegesen nagyobb, mint a készülékben. Ez azt jelenti, hogy a berendezésből anyag nem jut ki (illetve nem kerül vissza) diffúzió vagy turbulens keveredés útján; azaz **a vizsgált rendszer keveredésre nézve zárt**.

Az **impulzuszavarás**-nál a betáplálási áramba  $n_0$  (mol) mennyiségű nyomjelzőt juttatunk be a közepes tartózkodási időnél lényegesen rövidebb idő alatt és mérjük a jelzőanyag  $c(t)$  koncentrációját (mol/m<sup>3</sup>) a kilépő áramban az idő függvényében. A nyomjelző anyagnak az a hányada, amely a rendszert  $t$  és  $t + dt$  időközben elhagyja  $\dot{V}c(t)dt/n_0$ -val egyenlő.

A tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvénynek az előzőekben ismertetett definíciója értelmében:

$$E(t)dt = \frac{Vc(t)dt}{n_0} \quad (9.2-6)$$

A bevitt nyomjelző mennyiségét nem szükséges előzőleg megmérni, mivel a mért  $c(t)$  koncentráció–idő görbéből számítható:

$$n_0 = V \int_0^{\infty} c(t)dt \quad (9.2-7)$$

Ennek felhasználásával:

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t)dt} \quad (9.2-8)$$

#### *Tartózkodási idő eloszlás sűrűség görbék kiértékelése*

A választott matematikai modell  $P_i$  paramétereinek értékét úgy határozzuk meg, hogy az impulzus zavarásra kapott válaszgörbéhez regresszióval közelítjük a modell alapján számított válaszgörbét. A számított görbe akkor illeszkedik a legjobban a mérési adatokhoz, ha az eltérések négyzeteinek összege minimális.

#### *Tökéletesen kevert tartály*

Egy tartályt akkor tekinthetünk tökéletesen kevertnek, ha a betáplált anyag az átlagos tartózkodási időnél lényegesen rövidebb idő alatt egyenletesen eloszlik a teljes tartálytérfogatban. A gyakorlatban, ha nem túl viszkózus anyagot keverünk, ez a követelmény könnyen teljesíthető. Tökéletes keveredésnél a tartályban mindenütt ugyanaz a koncentráció és a kilépő áram összetétele megegyezik ezzel.

A nyomjelzőanyag instacionárius mérleg egyenlete:

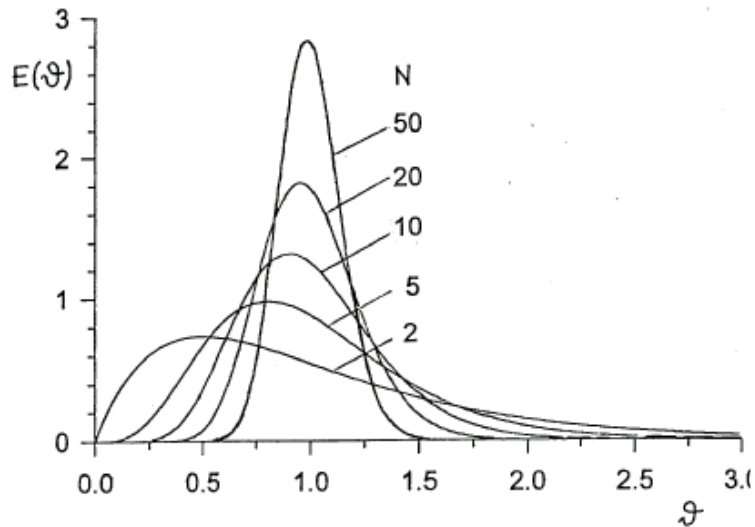
$$\dot{V}(c_{be} - c_{ki}) = V \frac{dc_{ki}}{dt} \quad (9.2-13)$$

Ebből levezethető a tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvény:

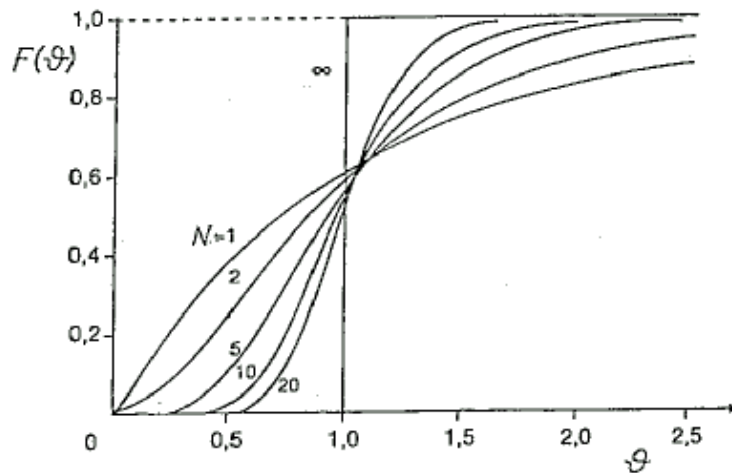
$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{1}{\bar{t}} \exp(-t/\bar{t}) \quad (9.2-14)$$

*Tartózkodási idő eloszlás sorbakapcsolt tartályok esetén (cellás modell)*

A tartózkodási idő eloszlás matematikai leírására legelőször a sorbakapcsolt, azonos térfogatú, teljesen kevert tartályokból álló modellt (az ú.n. *cellás vagy kaszkád modell-t*) használták.



9.2-2. ábra. Tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvény N darab tartályból álló kaszkád esetén



9.2-3. ábra. Tartózkodási idő eloszlásfüggvény sorbakapcsolt tartályokból álló rendszernél

A cellás modell dimenziómentes tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvénye:

$$E(\theta) = \frac{N(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} \exp(-N\theta) \quad (9.2-15)$$

ahol  $N$  a teljesen kevert tartályok (cellák) száma,  $\vartheta = t/\bar{t}$  a közepes tartózkodási időre vonatkoztatott dimenziómentes relatív idő,  $\bar{t}$  az átlagos tartózkodási idő az egész rendszerben.

A dimenziómentes szórásnégyzet:

$$\sigma^2 = 1/N \quad (9.2-16)$$

A cellás modell lépcsős készülékeknél használható, ahol megfelelő szerkezeti kialakítással megakadályozzuk a lépcsők közötti keveredést: pl. perforált tányérokka lépcsőkre osztott egyenáramú buborékoltató oszlopnál a folyadékfázis tartózkodási idő eloszlásának leírására adekvát ez a modell.

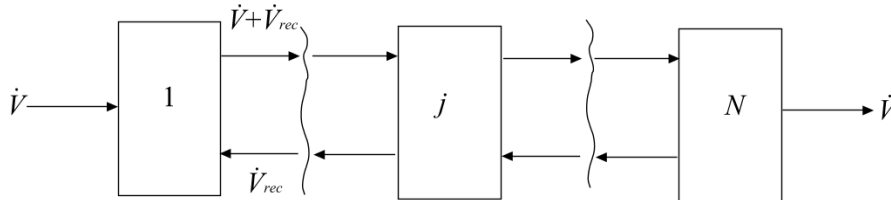
A tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvény számításánál, ha a  $\sigma^2$ -ből számított cellaszám ( $N$ ) nem egész szám, akkor a (9.2-16) egyenlet nevezőjében lévő  $(N-1)!$  helyébe a  $\Gamma$ -függvényt kell behelyettesíteni ( $\Gamma$ -modell).

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} x^{n-1} \exp(-x) dx \quad (9.2-17)$$

ha  $N$  pozitív egész szám, akkor  $\Gamma(N) = (N-1)!$

#### Recirkulációs modell

E modell szerint a készülék  $N$  egyenlő térfogatú tökéletesen kevert cellából áll. A szomszédos cellák között fellépő recirkuláció erősségét a  $\gamma$  recirkulációs tényező értékével jellemezzük:  $\gamma = \dot{V}_{rec} / \dot{V}$ , a recirkulációs áram ( $\dot{V}_{rec}$ ) és a betáplálási áram ( $\dot{V}$ ) hányadosa. A modell vázlatát a következő ábrán látható.



9.2-4. ábra. Recirkulációs modell

A tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvény egyenlete [1]:

$$E(\vartheta) = 2N\gamma \cdot a^{N+1} \sum_{j=1}^N A_j \cdot \exp(-z_j \vartheta) \quad (9.2-18)$$

ahol

$$A_j = (-1)^{j+1} \frac{\sin^2 \psi_j}{1 + z_j}$$

$$z_j = N \left[ 1 + 2\gamma (1 - a \cdot \cos \psi_j) \right]$$

$$a = \left( \frac{1 + \gamma}{\gamma} \right)^{1/2}$$

$\psi_j$  a következő transzcendens egyenlet  $j$ -edik gyöke

$$\psi_j (N + 1) + 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{\sin \psi_j}{a - \cos \psi_j} \right) = j\pi$$

A szórásnégyzet

$$\sigma^2 = \frac{1 + 2\gamma}{N} - \frac{2\gamma(1 + \gamma)}{N^2} \left[ 1 - \left( \frac{\gamma}{1 + \gamma} \right)^N \right] \quad (9.2-19)$$

### Diffúziós modell

A nyomjelzőanyagának a készülék térfogatelemére vonatkozó instacionárius mérlegegyenlete [2]:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\operatorname{div}(\mathbf{v}c_i) + \operatorname{div}(D \operatorname{grad} c_i) \quad (9.2-20)$$

ahol  $D$  diszperziós (más néven makrokeveredési vagy turbulens diffúziós) tényező ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $\mathbf{v}$  sebességvektor ( $\text{m}/\text{s}$ ).

Az időegység alatt bekövetkező koncentrációváltozás egyrészt konvekcióval  $[-\operatorname{div}(\mathbf{v}c_i)]$ , másrészt diffúzióval  $[\operatorname{div}(D \operatorname{grad} c_i)]$  jön létre. A (9.2-20) összefüggés a diffúziós vagy más néven diszperziós modell alap egyenlete.

Alkalmazzuk a fenti egyenletet nagy átmérőjű henger alakú készülékre.

$$D_{rad} \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right] + D_{ax} \frac{\partial^2 c}{\partial a^2} - v \frac{\partial c}{\partial a} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (9.2-21)$$

ahol  $D_{rad}$  és  $D_{ax}$  a radiális ill. tengelyirányú (axiális) keveredési tényező,  $r$  a sugárirányú helykoordináta (m),  $l$  hosszkoordináta (m),  $v$  a dugattyúszerű axiális áramlás sebessége.

- A fenti egyenlet akkor érvényes, ha a készülékben az áramlás turbulens (ekkor a fluidum axiális sebességprofilja közel dugattyúszerű),
- a radiális és az axiális keveredési tényező állandó,
- a radiális irányú sebesség zérus.

Kis átmérőjű, kör keresztmetszetű hengeres csőben, turbulens áramlásnál a radiális keveredés következtében a koncentráció a készülék egy adott keresztmetszetében mindenütt azonos. Ebben az esetben a (9.2-21) egyenlet tovább egyszerűsödik:

$$D_{ax} \frac{\partial^2 c}{\partial a^2} - v \frac{\partial c}{\partial a} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (9.2-22)$$

Ez az *egydimenziós diffúziós modell* transzportegyenlete.

Szorozzuk meg a (9.2-22) egyenlet mindkét oldalát a közepes tartózkodási idővel ( $\bar{t} = L/v$ ) és osszuk el a nyomjelző betáplálási koncentrációjával  $c_{be}$  (a bemenő-jel értékével).

$$\frac{D_{ax}}{vL} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial \theta} \quad (9.2-23)$$

ahol  $L$  a készülék hossza (m),  $z = l/L$  dimenziómentes helykoordináta,  $C = c/c_{be}$ . A  $(vL/D_{ax})$  dimenziómentes csoportot a szakirodalomban PECELET számnak ( $Pe$ ) hívják. Tökéletes makroméretű keveredésnél  $D_{ax}/vL = \infty$ , tökéletes kiszorításnál  $D_{ax}/vL = 0$ .

Ha a készülékhez csatlakozó betápláló és termékelvező csővezetékek átmérője a készülékénél lényegesen kisebb, akkor keveredés (diszperzió) csak a készülékben lép fel és a csövekben tökéletes kiszorítással számolhatunk (keveredésre nézve zárt rendszer). Ennek megfelelően a készülék elejére, illetve végére vonatkozó peremfeltételek:

$$vc_0 = vc|_{l=0} - D_{ax} \left. \frac{\partial c}{\partial a} \right|_{l=0} \quad \text{és} \quad \left. \frac{\partial c}{\partial a} \right|_{l=L} = 0 \quad (9.2-24)$$

A készülék elejére felírt LANGMUIR–DANCKWERTS peremfeltétel csak kevert rendszerre (pl. mechanikusan kevert oszlop) érvényes. E peremfeltétel szerint a koncentráció lefutásban a  $z = 0$  helyen szakadás van, stacionárius esetben is.

A tartózkodási idő eloszlás leírására az egydimenziós diffúziós modell a legkülönbözőbb folytonos üzemű vegyipari berendezésnél (töltött abszorber, folyadék-folyadék és szilárd-folyadék extraktor, buborékolató oszlop reaktor, golyós malom, stb.) bevált.

A keveredésre nézve mindkét végén zárt *egydimenziós diffúziós modell* tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvénye [3]:



$$E(\vartheta) = \frac{2}{Pe} \exp\left(\frac{Pe}{2}\right) \sum_{j=1}^{\infty} B_j \cdot \exp(-m_j \vartheta) \quad (9.2-25)$$

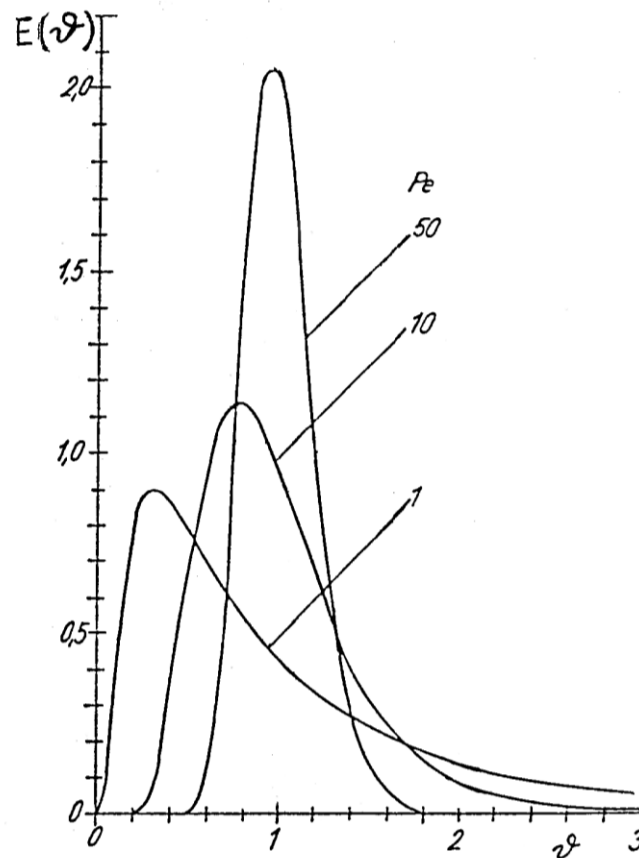
ahol

$$B_j = (-1)^{j+1} \frac{\varphi_j^2}{1+m_j}$$

$$m_j = \frac{\varphi_j^2}{Pe} + \frac{Pe}{4}$$

$\varphi_j$  a  $\text{ctg } \varphi_j = \frac{\varphi_j}{Pe} - \frac{Pe}{4\varphi_j}$  transzcendens egyenlet  $j$ -edik gyöke.

$$\text{A szórásnégyzet: } \sigma^2 = \frac{2}{Pe} \left( 1 - \frac{1}{Pe} [1 - \exp(-Pe)] \right) \quad (9.2-26)$$



9.2-5. ábra. Egydimenziós diffúziós modell tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvénye, ha a rendszer keveredésre nézve mindkét végén zárt

### 9.2.3. A készülék leírása és üzemeltetése

A kísérleti berendezés folyamatvázlata a 9.2-6. ábrán látható. A felső szinten elhelyezett adagoló tartályból desztillált vizet táplálunk a vizsgált készülékbe. A térfogatáramot rotaméterrel mérjük. A csapok megfelelő beállításával a kamrás reaktort, vagy a töltött oszlopot üzemeltethetjük.

A **kamrás reaktor** 58,5 mm átmérőjű, 200 mm hosszú acélső, melyet távtartó rudakra fűzött fémgyűrűk 5 egyenlő térfogatú kamrára (cellára) osztanak. Az álló gyűrűk belső átmérője 18,5 mm. A kamrák keverését a reaktorcsővel koncentrikus tengelyre szerelt, 40 mm átmérőjű sima keverőtárcsák biztosítják. A keverő fordulatszáma 0-1200 1/min tartományban fokozatmentesen változtatható. A folyadékot a reaktorba alul vezetjük be és fent távozik. A nyomjelzőt (300 g/l koncentrációjú konyhasó oldatot) a reaktor alján levő injekciós tűn keresztül juttatjuk be a készülékbe. A koncentrációval arányos vezetőképesség mérésére a reaktor felső részébe beépített elektródpár szolgál. A reaktort termosztáló köpeny veszi körül.

A **töltött oszlop** 35 mm átmérőjű, 910 mm hosszú üvegső. A töltetet (gömb, Raschig-gyűrű stb.) rendszeresen változtatjuk. Az oszlopban a folyadék alulról felfelé áramlik. A sóoldatot injekciós tűn keresztül adjuk be. A válaszjelet az oszlop tetején vezetőképesség mérő cellával mérjük.

A készülékbe beépített mérőcellák egy konduktométerhez csatlakoznak. A konduktométer kijelzi a koncentrációval arányos vezetőképességet. A konduktométer feszültség kimenőjele egy interfacen keresztül számítógépes mérőadatgyűjtő rendszerbe jut. A mérés indításától a számítógép, beállítható időközönként, a konduktométer kimenőjelét megméri és analóg/digitális jelátalakítás után 0-5 tartományban kijelzi. A mérés végén az adatok file-ba elmenthetők.

#### *A mérés kivitelezése*

Az adagoló tartályt desztillált vízzel feltöltjük. Elkezdjük a folyadék betáplálást. Célszerű a készüléket a mérés elkezdése előtt desztillált vízzel átmosni, hogy a folyadék kicserélődjék. Ezután állítsuk be a mérésvezető által megadott térfogatáramot (5-15 l/h) és a kamrás reaktornál a fordulatszámot (500-900 1/min). Injektáljuk be a nyomjelző anyagot (közel telített sóoldatból 1-5 ml-t) és ezzel egyidejűleg indítsuk el az adatgyűjtést (kezdjük el felírni az adatpárokat). 10-15 másodpercenként írjuk fel a vezetőképességmérő által kijelzett vezetőképességet, ezeket az idő – vezetőképesség adatpárokat kell majd a kiértékeléskor felhasználni. (Minél gyakrabban tudjuk felírni a vezetőképességet – ismert időhöz- annál pontosabb lesz a kiértékelés. Amikor a vezetőképesség már csökkenni kezd, elegendő 15-20 másodpercenként leírni a jelet. Ha a válaszjel megközelíti az alapjelet (a mérés kezdésekor az első szám a képernyőn) állítsuk le a mérést. Mindkét készüléken végezzenek 2-2 ismételt mérést és 2-2 különböző térfogatáramnál is mérjenek.

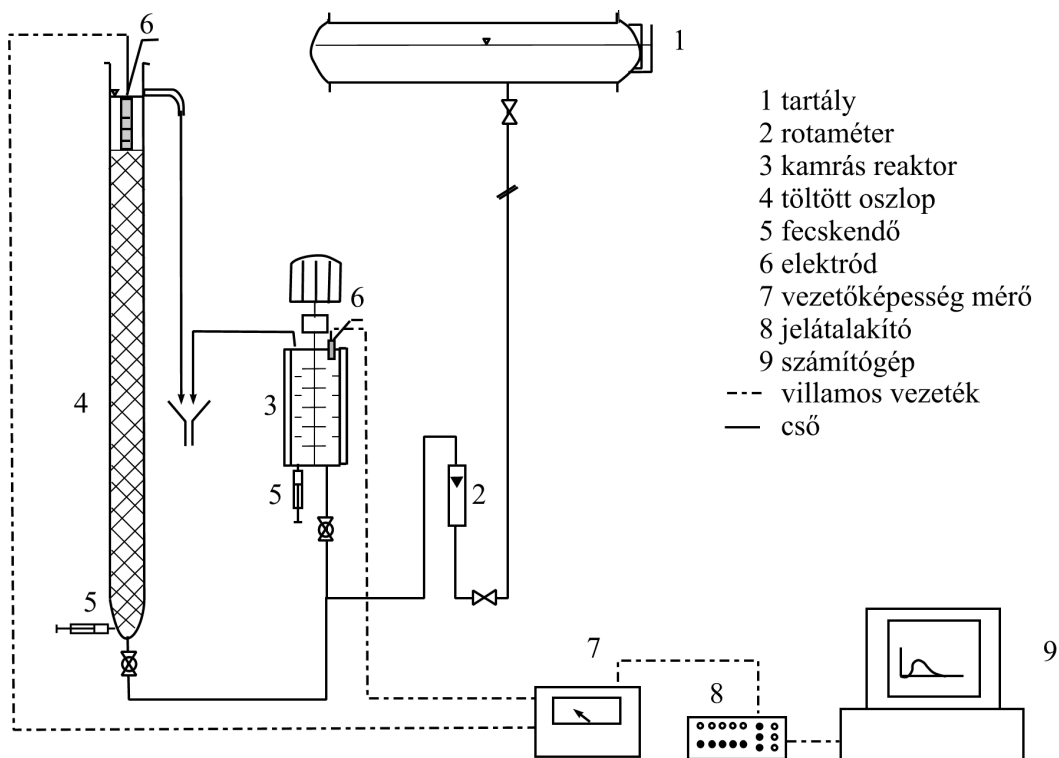
#### 9.2.4. A mérések értékelése, jegyzőkönyv

A mért impulzus válaszgörbék a TIE\_kiert.xlsm excel filelál értékelhetők (más néven menthetik, az eredeti file-t NE írják felül!). A beadandó jegyzőkönyvben (pdf) minden mérési adatsor (oktatói aláírással), a legjobbnak ítélt modellparaméterek és az átlagos tartózkodási idő értéke (mérésenként) és az Eredmény fülön előállítható diagramok szerepeljenek, értékeléssel együtt.

Az effektív cellaszám ( $N$ ) és a Peclet szám ( $Pe$ ) meghatározása mellett (minden mérésre) bátran próbálják meg különböző cellaszám ill  $Pe$  szám értékkel ábrázolni a válaszfüggvényt, és figyeljék meg a modellparaméter-változtatás hatását a válaszfüggvényre.

Értékeljék, hogy:

- a mérési adataik az illesztett egy paraméteres modellel jól leírhatóak-e,
- észleltek-e eltérést az ismételt mérések között, a modellparaméterek eltérnek-e,
- összefügg-e az alkalmazott térfogatáram és a kamrás reaktorban a cellás modell cellaszáma? Miért?



9.2-6. ábra Kísérleti berendezés tartózkodási idő eloszlás mérésére

**Irodalom:**

- [1] Roemer, M.H., Durbin, L.D.: Ind. Eng. Chem. Fundam., 6, 120 (1967)
- [2] Fonyó Zs., Fábry Gy.: Vegyipari művelettani alapismeretek, 552. old., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
- [3] Nagata, Sh.: Mixing, 227. old., J. Wiley, N.Y., 1975.

**Ajánlott irodalom:**

1. Levenspiel, O.: Chemical Reaction Engineering, J. Wiley, New York, 1972.
2. Pekovits L.: Az axiális keveredés problémája a modellezésben, Kémiai Közlemények, 35, 293 (1971)
3. Sawinsky J.: Kémiai reaktorok, (Egyetemi jegyzet kézirat), Budapest, 1999.

Készítette: Sawinsky János  
Simándi Béla

Ellenőrizte: Deák András

Módosította: Székely Edit  
(2015.03.01.)