





**PANNON EGYETEM**

**Mérnöki Kar**



Vegyésmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola

**Spontán és mesterséges folyamatok hatása rétegződésre  
hajlamos folyadék homogenizálására**

**DOKTORI (PH.D.) ÉRTEKEZÉS**

DOI:10.18136/PE.2020.745

Készítette:

**Bobek-Nagy Janka**

Okleveles vegyésmérnök

Témavezető:

**Rippelné Dr. Pethő Dóra**

Egyetemi docens

Spontán és mesterséges folyamatok hatása rétegződésre hajlamos folyadék homogenizálására

Az értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében készült a Pannon Egyetem  
Vegyésmérnöki-és Anyagtudományok Doktori Iskolája keretében

vegyésmérnöki tudományágban

Írta: Bobek-Nagy Janka

Témavezető: Rippelné Dr. Pethő Dóra

Elfogadásra javaslom (igen/nem):

.....

Rippelné Dr. Pethő Dóra

A jelölt a doktori szigorlaton ..... %-ot ért el.

Veszprém,

.....

Dr. Gubicza László  
Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve:..... igen /nem

.....

Bíráló neve: ..... igen /nem

.....

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján .....%-ot ért el.

Veszprém,

.....

Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

Veszprém,

.....

EDHT elnöke

## **Kivonat**

A szerző a dolgozatban folyadékok keverésével foglalkozik egy olyan rendszerben, ahol a keverést külső cirkulációval valósítják meg. A vizsgált rendszer különböző sűrűségű folyadék rétegeket tartalmazott.

A szerző a keverés jellemzése céljából tartózkodási idő eloszlás vizsgálatokat hajtott végre egységugrás függvény zavarással. Megvizsgálta a nyomó és szívó csonkok vertikális pozíciójának hatását a tartózkodási idő eloszlás függvényre. Megállapította a csonk pozíciók hatását a tartózkodási idő várható értékére, a hold-back értékre, a holt térfogat nagyságára valamint a holtidőre. A keverés minőségét tanulmányozta kombinált csonk pozíciók esetén is. Vizsgálta a homogenizálást rétegzett rendszerből kiindulva külső cirkulációt alkalmazva. A kapott adatokat homogenitásban és inhomogenitásban számszerűsítette és így értékelte ki. Tanulmányozta a csonkpozíciók hatását az elért homogenitásra.

A csonk pozíciók hatásainak feltérképezése mellett a geometria hatásának tanulmányozására is figyelmet fordított a szerző. Megvizsgálta a hengerelem szám hatását a tartózkodási idő eloszlás függvények alakjára továbbá a homogenizálás hatékonyságára.

Kis laboratóriumi mérések mellett kísérleteket folytatott nagy laboratóriumi tartályban a méretnövelés hatásainak megfigyelése céljából.

Munkája kiterjedt a vizsgált tartályok numerikus áramlástan szimulátorban történő leképezésére és azokban a keverés vizsgálatára.

## **Abstract**

In this work, the mixing of liquids was investigated in a system where homogenization was achieved by external circulation. The examined system contained liquid layers of different densities.

The author carried out step-input residence time distribution (RTD) experiments to characterize the mixing phenomenon in the tested system. The effects of the position of the inlet and the outlet of the cylinder tank were observed on the residence time distribution function. Furthermore, the influence of their position was assessed on the rate of residence time and hold-back moreover the value of dead volume and dead time. The efficiency of mixing was studied in case of several combinations of inlet and outlet position. Besides RTD experiments, homogenization was analyzed on two-layer stratified liquid by external circulation. The gathered data were evaluated in homogeneity and inhomogeneity values. The impact of inlet and outlet position was studied on the final homogeneity.

The author monitored the effect of the shape of the tank on mixing. In this work, 1, 3 and 5 cylinders were continuously integrated into one vessel to make special storage tanks. The influence of the numbers of the cylinders was recognized on the shape of residence time distribution function curve and on the efficiency of homogenization.

To examine the significance of scale-up, measurements were implemented in a pilot-scale tank as well.

The author carried out the experiments in computational fluid dynamics simulation software.

## Résumé

Cette étude est consacré au mélange des liquides dans un système où le mélange était réalisé par une circulation externe. Le système étudié contenait des stratifications liquides de différentes densités.

Pour caractériser le mélange, l'auteur a utilisé la distribution de temps de séjour (DTS) par emploi de l'interférence de la fonction échelon unité. C'est l'effet de la position verticale des soupapes de refoulement et d'aspiration qui a été examiné sur la fonction de la distribution de temps de séjour. Ainsi l'auteur a déterminé l'effet des positions des soupapes sur la moyenne du temps de séjour, sur la valeur hold-back, sur la volume de la zone morte et sur le temps mort. La qualité du mélange a été observée même dans le cas de la position des soupapes combinées. Pour définir l'homogénéité on l'a commencé à examiner par un système stratifié utilisant une circulation externe. Les données reçues au cours du processus ont été quantifiées en homogénéité et en inhomogénéité pour obtenir les valeurs exactes. L'important c'était l'observation de l'effet de la position des soupapes par rapport à l'homogénéité obtenue.

Outre cela l'auteur a fait l'attention à l'effet géométrique. L'effet du nombre des éléments de cylindre a été examiné concernant la distribution de temps de séjour et l'efficacité de l'homogénéisation.

Il y avait des examinations dans un laboratoire à un projet de petit dimension mais l'auteur a fait des calculations même dans un laboratoire à un projet pilote pour surveiller les effets de l'augmentation des dimensions.

Au cours de cette examination l'auteur a étudié les processus de mélange des réservoirs dans un simulateur de mécanique des fluides numérique (CFD).

# Tartalomjegyzék

Jelölés jegyzék.....	I
Rövidítés jegyzék .....	V
Ábra jegyzék.....	VI
Táblázat jegyzék.....	XI
Bevezetés.....	1
1 Irodalom .....	3
1.1 Fluidumok mozgása .....	4
1.1.1 Kontinuitási-tétel .....	7
1.1.2 Impulzus egyenlet.....	8
1.2 Keverés folyamata.....	10
1.3 Folyadékok keverése.....	12
1.3.1 Dinamikus keverők.....	12
1.3.2 Statikus keverők .....	17
1.3.3 Buborékoltatók .....	18
1.3.4 Rétegződésre hajlamos elegyedő folyadékok keverése.....	20
1.4 Homogenitás meghatározása.....	23
1.5 Tartózkodási idő függvények.....	25
1.5.1 A sűrűségfüggvények meghatározása .....	28
1.5.2 Válaszfüggvények kiértékelése .....	32
1.6 Kevertség .....	35
1.7 Numerikus áramlástanai modellek.....	39
2 Anyag és módszer .....	42
2.1 Analitika.....	42
2.1.1 Kis laboratóriumban alkalmazott detektálási rendszer.....	42
2.1.2 Nagy laboratóriumban alkalmazott detektálási rendszer.....	43
2.2 Tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok.....	45
2.3 Recirkulációs vizsgálatok .....	47
2.4 Méretcsökkentés .....	47
2.5 Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály .....	53
2.6 Kis laboratóriumi, több hengeres tartály.....	57
2.7 Nagy laboratóriumi, egy hengeres tartály .....	60
2.8 Szimulációs vizsgálat.....	62
2.8.1 Tartózkodási idő szimulációs meghatározása.....	63
2.8.2 Recirkuláció szimulációs vizsgálata.....	67
3 Eredmények és kiértékelés .....	69
3.1 Szívócsonk pozíciójának hatása.....	69
3.1.1 Tartózkodási idő vizsgálatok .....	69
3.1.2 Recirkulációs vizsgálatok .....	77
3.2 Nyomócsonk hatásainak vizsgálata .....	80
3.2.1 Tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok .....	80
3.2.2 Recirkulációs vizsgálatok .....	87
3.3 Kombinált csonk pozíciók .....	88
3.3.1 poz_1_1 csonk kombináció .....	88

3.3.2	poz_2_1 csonk kombináció .....	90
3.3.3	poz_2_3 csonk kombináció .....	93
3.4	Geometria hatása.....	96
3.4.1	CH1-es mintavételezési pont helyzetének vizsgálata.....	96
3.4.2	Tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok .....	98
3.5	Nagy laboratóriumban kapott eredmények .....	105
3.6	Méretnövelés hatásai.....	112
3.6.1	Laboratóriumi mérések eredményei .....	112
3.6.2	Szimulációs eredmények .....	116
	Összefoglalás .....	120
	Tézisek.....	122
	Thesis.....	125
	Publikációs jegyzék .....	128
	Irodalom jegyzék .....	132
	Köszönetnyilvánítás.....	138
	Melléklet.....	139



## Jelölés jegyzék

$a$	gyorsulás [ $\text{m s}^{-2}$ ]
$A$	felület [ $\text{m}^2$ ]
$A_1, A_2, A_3$	felület a szegregáció grafikus meghatározásához [ $\text{m}^2$ ]
$A_{kl}$	belépési csomak átmérő felülete kis laboratóriumi tartály esetén [ $\text{m}^2$ ]
$B$	térfogatáram [ $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ]
$c$	koncentráció [ $\text{mol m}^{-3}$ ]
$c_A$	„A” komponens koncentrációja [ $\text{mol m}^{-3}$ ]
$c_{\text{átl}}$	átlagos koncentráció [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$c_t$	koncentráció a $t$ időpillanatban [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$c_0$	koncentráció a $t=0$ időpillanatban [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$c_1$	„1-es” komponens koncentrációja [ $\text{mol m}^{-3}$ ]
$c_2$	„2-es” komponens koncentrációja [ $\text{mol m}^{-3}$ ]
$c_i$	$i$ -komponens koncentrációja [ $\text{mol m}^{-3}$ ]
$C_{1\varepsilon}$	modell konstans [-], $C_{1\varepsilon}=1.44$
$C_2$	modell konstans, [-], $C_2=1.9$
$d$	keverő átmérője [ $\text{m}$ ]
$d_0$	fúvóka (torok) átmérő [ $\text{m}$ ]
$d_{0ip}$	fúvóka (torok) átmérő az ipari tartály esetén [ $\text{m}$ ]
$d_{0kl}$	fúvóka (torok) átmérő a kis laboratóriumi tartály esetén [ $\text{m}$ ]
$d_{ip}$	ipari tartály belépő csomak átmérő [ $\text{m}$ ]
$d_{kl}$	kis laboratóriumi tartály belépő csomak átmérő [ $\text{m}$ ]
$D$	molekuláris diffúziós tényező [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$\frac{D}{Dt}$	szubsztanciális derivált [ $\text{s}^{-1}$ ]
$D_A$	„A” komponens molekuláris diffúziós tényezője [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$D_{ip}$	ipari tartály átmérője [ $\text{m}$ ]
$D_{kl}$	kis laboratóriumi tartály átmérője [ $\text{m}$ ]
$D_{nl}$	nagy laboratóriumi tartály átmérője [ $\text{m}$ ]
$e$	egység vektor

$E(t)$	sűrűség függvény [ $s^{-1}$ ]
$\mathbf{F}$	erő vektor [N]
$F(t)$	eloszlás függvény [-]
$F_n$	felületre merőlegesen ható erő komponens [N]
$F_s$	felülettel párhuzamosan ható erő komponens [N]
$Fr$	Froude-szám [-]
$\mathbf{g}$	gravitációs gyorsulás, 9.81 [ $m\ s^{-2}$ ]
$G$	geometriai méretcsökkentési arány [-]
$H$	hold-back érték [-]
$H(t)$	egységugrás függvény
$H_t$	homogenitás (%)
$I(t)$	belső koreloszlás sűrűség függvény [ $s^{-1}$ ]
$I_t$	inhomogenitás (%)
$k$	turbulens kinetikus energia [ $J\ kg^{-1}$ ]
$L$	jellemző hossz méret [m]
$m$	tömeg [kg]
$M$	térfogatra normált kinetikus energia [ $kg\ m^{-2}\ s^{-2}$ ]
$M_{ip}$	térfogatra normált kinetikus energia az ipari tartály esetén [ $kg\ m^{-2}\ s^{-2}$ ]
$M_{kl}$	térfogatra normált kinetikus energia a kis laboratóriumi tartály esetén [ $kg\ m^{-2}\ s^{-2}$ ]
$MD_n$	kevertségi fok
$M_n$	valószínűségi változó n-dik momentuma
$M_0, M_1$	valószínűségi változó nulladik, első momentuma
$N$	fordulatszám [ $min^{-1}$ ]
$o$	„A” anyag térfogat eloszlása adott pontban és időben
$\bar{o}$	„A” anyag átlagos térfogat eloszlása
$p$	valószínűség
$P$	nyomás [Pa]
$P_k$	kinetikus energia növekmény a felhajtóerő és az átlagos sebesség következtében [ $J\ kg^{-1}s^{-1}$ ]
$p_h$	hidrosztatikai nyomás [Pa]

$r$	sugár [m]
$Re$	Reynolds-szám [-]
$Re_{ip}$	Reynolds-szám ipari tartályra [-]
$Re_{kl}$	Reynolds-szám kis laboratóriumi tartályra [-]
$Re_k$	keverési Reynolds-szám [-]
$Re_j$	jet Reynolds-szám [-]
$Ri$	Richardson-szám [-]
$S$	szegregáció [-]
$t$	idő [s]
$T$	hőmérséklet [K]
$\bar{t}$	átlagos tartózkodási idő [s]
$t_h$	holt idő (min)
$\bar{t}_{ip}$	ipari berendezés átlagos tartózkodási ideje [s]
$\bar{t}_{kl}$	kis laboratóriumi berendezés átlagos tartózkodási ideje [s]
$t'$	megfigyelés kezdetének pillanata [s]
$u_x'$	x-irányú turbulens sebesség komponens [ $m\ s^{-1}$ ]
$u_y'$	y-irányú turbulens sebesség komponens [ $m\ s^{-1}$ ]
$U_0$	fúvókából kilépő fluidum sebessége [ $m\ s^{-1}$ ]
$\mathbf{v}$	sebesség vektor, $\mathbf{v}=(u,v,w)$ [ $m\ s^{-1}$ ]
$v_a$	axiális sebesség [ $m\ s^{-1}$ ]
$v_t$	tangenciális sebesség [ $m\ s^{-1}$ ]
$v_r$	radiális sebesség [ $m\ s^{-1}$ ]
$V$	térfogat [ $m^3$ ]
$V_{ip}$	ipari tartály térfogat [ $m^3$ ]
$V_{kl}$	kis laboratóriumi tartály térfogat [ $m^3$ ]
$V_{nl}$	nagy laboratóriumi tartály térfogat [ $m^3$ ]
$W(t)$	koreloszlás függvény [-]
$x,y,z$	tér koordináták Descartes-féle koordináta-rendszerben [m]
$z$	jet áramlás kialakulásának tartománya [m]
$z_{ip}$	jet áramlás kialakulásának tartománya ipari tartály esetén [m]
$z_{kl}$	jet áramlás kialakulásának tartománya kis laboratóriumi tartály esetén [m]

$\alpha$	molekula kora (min)
$\bar{\alpha}$	átlagos kor (min)
$\alpha_p$	molekula kora egy adott pontban (min)
$\gamma$	$\frac{c - c_1}{c_2 - c_1}$
$\delta$	deformáció mértéke
$\delta(t)$	Dirac-delta függvény
$\delta A$	infinitézimálisan kis felület (m <sup>2</sup> )
$\delta V$	infinitézimálisan kis térfogat (m <sup>3</sup> )
$\Delta$	delta
$\Theta$	dimenziómentes idő [-]
$\varepsilon$	turbulens kinetikus energia disszipációs aránya [m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> ]
$\mu$	dinamikai viszkozitás [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\mu_2$	válószerűségi változó második centrális momentuma
$\mu_T$	turbulens dinamikai viszkozitás [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\xi$	adott idő [min]
$\rho$	sűrűség [kg m <sup>-3</sup> ]
$\sigma$	normális feszültség [Pa]
$\sigma^2$	tartózkodási idő szórásnégyzete, varianciája [s <sup>2</sup> ]
$\sigma_\varepsilon$	TDR-Prandtl szám, [-], $\sigma_\varepsilon=1.2$
$\sigma_k$	TKE- Prandtl szám [-], $\sigma_k=1.0$
$\tau$	tartózkodási idő várható értéke [s]
$\nu$	kinematikai viszkozitás [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\nu_T$	turbulens kinematikai viszkozitás [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\omega$	csúsztató feszültség [Pa]
$\nabla$	nabla

## Rövidítés jegyzék

CFD	computational fluid dynamics, numerikus áramlástan modellek
FEM	finite element method, véges elemek módszere
FDM	finite difference method, véges differenciák módszere
FVM	finite volume method, véges térfogatok módszere
lab.	laboratóriumi
NDP	number of discrete points, diszkrét pontok száma
neg.	negatív egységugrás függvény
PC	personal computer, személyi számítógép
poz.	pozitív egységugrás függvény
TKE	tökéletesen kevert egység
UDF	user defined function, felhasználó által meghatározott függvény

## Ábra jegyzék

1. ábra:  $\Delta A$  felületre a; ható erők [6] és b; feszültségek [4]
2. ábra: Differenciális folyadéktérfogat a tömegmegmaradás szemléltetéséhez [2]
3. ábra: A dinamikus keverők által keltett sebesség komponensek (a;  $v_a$ : axiális sebesség,  $v_t$ : tangenciális sebesség,  $v_r$ : radiális sebesség) [11] és áramlási képek (b; síklapátos keverő c; propeller keverő d; turbinakeverő) [10]
4. ábra: Síklapátos keverők (a; lapkeverő b; karos keverő c; ferde lapátú karos keverő d; több karú karos keverő e; horgony keverő (ankerkeverő) f; ujjkeverő g; h; kalodás keverő [10]
5. ábra: Axiális áramlást keltő keverők (a; propeller keverő, b; döntött lapátú turbina keverő, c; Pfaudler-féle keverő, d; MIG keverő (Ekato Holding GmbH.), e; INTERMIG keverő (Ekato Holding GmbH.) [12]
6. ábra: Radiális áramlást keltő keverők a; nyitott, sík lapátos turbó keverő, b; Rushton turbina c; nyitott lapátú keverő d; Scaba SRGT CD6 (Smith) típusú turbókeverő e; nyitott lapátú, tányéros keverő f; rugós keverő [12]
7. ábra: Kenics, Komax, SMX és Novel típusú statikus keverők [14]
8. ábra: Gáz-folyadék érintkeztető berendezések alacsony viszkozitású folyadékokhoz a; buborék kolonna, b; tányéros kolonna, c; kevert tartály d; gáz-folyadék ejektor, e; statikus keverő, f; bemerülő porlasztó, g; pneumatikus porlasztó (L: folyadék fázis, G: gáz fázis) [12]
9. ábra: A tartózkodási idő a; sűrűség és b; eloszlás függvénye [50]
10. ábra: Belső koreloszlás sűrűség függvény [50]
11. ábra: Zavaró függvények a; Dirac- $\delta$  b; egységugrás c; szög-függvény d; random függvény [54]
12. ábra: Dirac- $\delta$  függvény [50]
13. ábra: Egységugrás függvény [50]
14. ábra: Egységugrás függvényre adott válaszfüggvények a; dugó jellegű áramlás, b; dugó jellegű áramlás longitudinális keveredéssel, c; tökéletes keveredés, d; holt térfogatot tartalmazó rendszer [51]

15. ábra: Dirac- $\delta$  zavaró függvényre adott válasz függvények a; dugó jellegű áramlás, b; dugó jellegű áramlás longitudinális keveredéssel, c; tökéletes keveredés, d; holt térfogatot tartalmazó rendszer [51]
16. ábra: Hold-back érték grafikus értelmezése [51]
17. ábra: Szegregáció grafikus értelmezése a; reális rendszer, b; holt térfogatot tartalmazó rendszer c; cső jellegű áramlás longitudinális keverés esetén [51]
18. ábra: Kis laboratóriumi mérőrendszer
19. ábra: a; Irányítóegység b; Vezetőképesség-mérő készülék
20. ábra: Advantech.Adam/Apax.NET Utility program felülete
21. ábra: ADAMView program felülete
22. ábra: Tartózkodási idő eloszlás vizsgálat általános mérés elrendezése (1. kísérleti tartály, 2. oldat tároló tartály, 3. perisztaltikus pumpa, 4. puffer tartály, 5. rotaméter, 6. szintszabályozó tartály)
23. ábra: Recirkulációs vizsgálat általános mérés elrendezése (1. kísérleti tartály, 3. perisztaltikus pumpa, 4. puffer tartály, 5. rotaméter, 7. túlfolyó tartály)
24. ábra: Szabad turbulens sugár áramlástere [7] ( $d_0$ : kiáramlás kezdeti átmérője)
25. ábra: A belépő  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  oldat áramlási képe
26. ábra: Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály sematikus rajza a kilépő csanak pozíciójának vizsgálata céljából
27. ábra: Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály sematikus rajza a belépő csanak pozíciójának vizsgálata céljából
28. ábra: Kis laboratóriumi, több hengeres tartály sematikus rajza
29. ábra: Nagy laboratóriumi tartály sematikus rajza
30. ábra: A kis laboratóriumi tartály leképezett geometriája tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok céljából a; iso nézet b; felül nézet
31. ábra: Kis laboratóriumi tartály hálója a; iso nézetben b; tetraédes háló
32. ábra: Kis laboratóriumi tartályon végzett hálófüggetlenségi vizsgálat eredménye
33. ábra: Kis laboratóriumi tartály recirkulációs vizsgálatára képzett geometria
34. ábra: Ugrás függvénnyel zavart rendszer eloszlás függvényei különböző elvételi csanak pozíciókban (TKE: tökéletesen kevert egység) a; pozitív ugrás függvény b; negatív ugrás függvény zavaró jel esetén

35. ábra: A szívócsonk pozíciójának hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra a; pozitív ugrás függvény b; negatív ugrás függvény zavaró jel esetén
36. ábra: Fotó a betáplált oldat áramlási útjáról a;  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  betáplált oldat  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségűbe b;  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  betáplált oldat  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségűbe
37. ábra: A CH1-es és CH2-es mérési ponton mért sűrűség különbsége a; pozitív ugrás függvény esetén b; negatív ugrás függvény esetén
38. ábra: poz\_2\_0 mérés végén vett minták sűrűsége negatív egység ugrás függvény betáplálás után
39. ábra: CFD vizsgálat során kapott eloszlás függvények a; negatív egység ugrás zavaró függvény b; pozitív egység ugrás zavaró függvény c; gravitációmentes eset
40. ábra: Különböző folyadékmagasságban rögzített sűrűség az idő függvényében a; negatív ugrás függvény betáplálás esetén b; pozitív ugrás függvény betáplálás esetén
41. ábra: Rétegzett rendszer kialakítása
42. ábra: Homogenitás értékek recirkulációs mérés esetén a; CH2-es mérési ponton b; CH1-es mérési ponton
43. ábra: CH1 és CH2 mérési pontokon számolt homogenitás értékek különbsége az idő függvényében
44. ábra: Negatív ugrás függvénnyel zavart rendszer eloszlás függvényei különböző betáplálási csonk pozíciókban (TKE: tökéletesen kevert egység)
45. ábra: Folyadékszint alatti nyomócsonk pozíciók és a holtidő közötti lineáris összefüggés
46. ábra: Nyomócsonk pozíciójának hatása a tartózkodási idő várhatóértékre, hold-back értékre és holt térfogatra  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  betáplált oldat esetén
47. ábra: Negatív ugrás függvény betáplálással rögzített sűrűség adatok a CH1-es mintavételezési ponton
48. ábra: Sűrűség különbség a két mérési pont között  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű betáplált oldat esetén
49. ábra:  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálása után kapott eloszlás függvények a nyomócsonk pozíciójának függvényében



50. ábra: Sűrűség eredmények a CH1-es mintavételezési ponton  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálás esetén
51. ábra: Mérések utáni mintavételek eredményei  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű betáplált oldat esetén
52. ábra: Homogenitás a CH2-es (a;) és CH1-es (b;) mintavételezési pontokon recirkulációs vizsgálat során
53. ábra: Egységugrás függvényre adott eloszlásfüggvények a; negatív ugrás függvény b; pozitív ugrás függvény esetén poz\_1\_1 csonk pozíció vizsgálatok
54. ábra: a; Homogenitás a CH1-es mintavételezési ponton b; Homogenitás különbség a CH1 és CH2 mintavételezési pontok között poz\_1\_1 csonk pozíció vizsgálatok
55. ábra: Egységugrás függvényre adott eloszlásfüggvények a; negatív ugrás függvény b; pozitív ugrás függvény esetén poz\_2\_1 csonkpozíció vizsgálatok
56. ábra: Homogenitás a CH1-es mintavételezési ponton poz\_2\_1 kombinált csonk pozíció vizsgálatok
57. ábra: poz\_2\_3 kombinált csonkpozíció eloszlás függvényei a; negatív egységugrás esetén b; pozitív egységugrás esetén
58. ábra: CH1-es mintavételezési ponton rögzített sűrűség eredmények a; negatív egység ugrás függvény során b; pozitív egységugrás függvény során
59. ábra: Sűrűség különböző mintavételi pontban a; negatív egység ugrás függvény után b; pozitív egységugrás függvény vizsgálat után
60. ábra: Homogenitás a CH1-es mintavételezési ponton
61. ábra: 5 henger elemszámú tartály konstrukció esetén a négy CH1 elektród pozíció esetén kapott sűrűség adatok negatív egységugrás betáplálás esetén a; CH1-es b; CH2-es mintavételezési ponton
62. ábra: 4 kísérlet sűrűség eredményének szórása a CH1 és CH2 mintavételezési ponton
63. ábra: Egységugrás függvény alkalmazása különböző henger elemszámú geometria vizsgálatára a; negatív egységugrás függvény válaszfüggvénye b; pozitív egységugrás függvény válaszfüggvénye

64. ábra: CH1 és CH2 mintavételezési pontok között mért sűrűség különbség különböző henger elemszám függvényében a; negatív egységugrás során b; pozitív egységugrás során
65. ábra: 5 hengerelemű tartály esetén vett minták sűrűsége  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálása után
66. ábra: 5 hengerelemű tartály esetén vett minták sűrűsége  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálása után
67. ábra: Recirkulációs kísérletek során kapott a; sűrűség eredmények a CH2-es mintavételezési ponton b; homogenitás eredmények a CH2-es mintavételezési ponton
68. ábra: Inhomogenitás a két mérési pont között
69. ábra: Nagy laboratóriumi tartályban végzett kísérletek sűrűség eredményei a;  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  b;  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálása esetén
70. ábra:  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű betáplált oldat esetén kapott (1) és a tökéletesen kevert üst (TKE) eloszlás függvénye b; a két eloszlás függvény különbsége
71. ábra:  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű betáplált oldat esetén kapott (1) és a tökéletesen kevert üst (TKE) eloszlás függvénye b; a két eloszlás függvény különbsége
72. ábra: Nagy laboratóriumi tartályban végzett recirkulációs mérés során kapott sűrűség eredmények
73. ábra: Nagy laboratóriumi tartályban végzett recirkulációs mérés során számított homogenitás eredmények, 95 %-os homogenitás – piros vonal
74. ábra: Kis és nagy laboratóriumi tartályban a tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok alkalmával kapott tartózkodási idő eloszlás függvények a;  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  b;  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  betáplálás esetén
75. ábra: Kis és nagy laboratóriumi tartályban a kilépési csomagtól elhelyezett elektródokon kapott homogenitás
76. ábra: CFD szimulációk során kapott sűrűség görbék tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok esetén különböző tartály méretben a; negatív egységugrás b; pozitív egységugrás függvény zavarás
77. ábra: CFD szimulációk során kapott homogenitás görbék recirkulációs vizsgálatok esetén különböző tartály méretben

## Táblázat jegyzék

1. táblázat: Ipari tartály fizikai paraméterei
2. táblázat: Különböző módszerekkel kapott eredmények összefoglalása
3. táblázat: Különböző méretű kísérleti tartályok arányai
4. táblázat: Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály belépő, kilépő csonkjának és az elektródoknak helykoordinátája (mm) a kilépő csonk pozíciójának vizsgálata céljából
5. táblázat: Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály belépő, kilépő csonkjának és az elektródoknak helykoordinátája (mm) a belépő csonk pozíciójának vizsgálata céljából
6. táblázat: Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály belépő, kilépő csonkjának és az elektródoknak helykoordinátája (mm) kombinált csonk pozíciók vizsgálata céljából
7. táblázat: Kísérlet utáni mintavételi helyek a kis laboratóriumi, egy hengeres tartály esetén
8. táblázat: Kis laboratóriumi, több hengeres tartály belépő, kilépő csonkjának és az elektródoknak helykoordinátája (mm)
9. táblázat: Mérési paraméterek a kis laboratóriumi, több hengeres tartály esetén
10. táblázat: Kísérlet utáni mintavételi helyek a kis laboratóriumi, több hengeres tartály esetén
11. táblázat: Nagy laboratóriumi, egy hengeres tartály belépő, kilépő csonkjának és az elektródok helykoordinátái (mm)
12. táblázat: Kis laboratóriumi tartály leképzett geometriájának paraméterei [m]
13. táblázat: Kis laboratóriumi tartály háló függetlenségi vizsgálata
14. táblázat: Lamináris és  $k - \epsilon$  turbulens modellel kapott eredmények összehasonlítása
15. táblázat: A szívócsonk pozíciójának hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra
16. táblázat: CFD vizsgálat során számolt tartózkodási idő várható értékek
17. táblázat: A nyomócsonk pozíciójának hatása a tartózkodási idő várhatóértékre, hold-back értékre és holt térfogatra  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  betáplált oldat esetén
18. táblázat: A nyomócsonk pozíciójának hatása a hold-back értékre és holtidőre  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  betáplált oldat esetén

19. táblázat: poz\_1\_1 kombinált csonk pozíciók hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra (neg.=negatív egységugrás függvény, poz.= pozitív egységugrás függvény)
20. táblázat: poz\_2\_1 kombinált csonk pozíciók hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra (neg.=negatív egységugrás függvény, poz.= pozitív egységugrás függvény)
21. táblázat: Kombinált csonk pozíciók hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra (neg.=negatív egységugrás függvény, poz.= pozitív egységugrás függvény)
22. táblázat: Geometria hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra (neg.=negatív egységugrás függvény, poz.= pozitív egységugrás függvény)
23. táblázat: Szegregáció értéke a betáplált oldat sűrűsége és a henger elemszám függvényében
24. táblázat: 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálásakor kapott holt idők (t<sub>h</sub>) és az elvárt 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat eléréséhez szükséges idő
25. táblázat: 1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálásakor kapott holt idők (t<sub>h</sub>) és az elvárt 1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat eléréséhez szükséges idő
26. táblázat: Tartályra jellemző átlagos kor és az elektródok környezetére jellemző átlagos kor különböző sűrűségű betáplált oldat esetén
27. táblázat: Nagy laboratóriumi tartályban végzett recirkulációs mérés során a 95 %-os homogenitás eléréséhez vagy meghaladásához szükséges idő
28. táblázat: A méretnövelés hatása a tartózkodási idő várható értékére, a hold-backre, a holtidőre és a holt térfogatra (lab.: laboratóriumi)
29. táblázat: A méretnövelés hatása a szegregációra (\*grafikus módszerrel meghatározott, lab.: laboratórium)
30. táblázat: A méretnövelés hatása a tartózkodási idő várható értékére, a hold-backre és a holt térfogatra (lab.: laboratórium)

## Bevezetés

### Bevezetés

A homogenizálás a vegyipar egyik alapvető művelete. Általában mechanikus keverőket alkalmaznak homogenizálás céljából, azonban gázok bevezetése is alkalmas a feladatra. Nagy méretű tartályok esetén gyakran alkalmaznak külső szivattyút, mely adott ideig keringeti a tartály tartalmát.

A megfelelő homogenizálási módszer megtalálása mellett kihívást jelent a homogenitás számszerűsítése, illetve a meghatározásához szükséges analitikai módszer megválasztása. Az áramló folyadékban lejátszódó keveredési jelenségekkel kapcsolatban már a 19. és 20. század fordulóján is zajlottak olyan eredményes kutatások, melyek mind a mai napig meghatározó jelentőségűek. Ezek közül kiemelkedik *Osborne Reynolds* munkássága, mely során a róla elnevezett dimenziómentes összefüggés alapján kategorizálta a fluidumok áramlását. Az 1950-es években *Peter Danckwerts* publikált a folyadékelemek tartózkodási idejének matematikai leírásával kapcsolatban: definiálta ezek eloszlás- és sűrűségfüggvényét, illetve definiálta a hold-back és szegregáció fogalmát. Ezeknek a fogalmaknak a jelentősége megkérdőjelezhetetlen, hiszen egyrészt *Danckwerts* 1957-ben publikált cikke számos korabeli kutatás alapjául szolgált, másfelől mind a mai napig ezeken keresztül történik a keverési művelet hidrodinamikai jellemzése.

A kutatásom egy ipari problémára épül. Mégpedig nagy méretű ( $\sim 100 \text{ m}^3$ ), rétegződésre hajlamos folyadékot tároló tartályokban a folyadék homogenizálás vizsgálatára és minősítésére irányul. A homogenizálás során a tartályok alján elhelyezett szívócsonkon keresztül a tartályban lévő oldatot adott térfogatárammal kiveszik, és egy külső keringető szivattyúval a tartály folyadékfelszíne fölötti belépő cső csonkon keresztül a tartályba visszanyomatják. A keringetés térfogatárama technológiai adat. A homogenizálást adott ideig végzik. A tartályra jellemző átlagos koncentrációt a szívócsonk mintavételi csonkján vett minta alapján határozzák meg. A vizsgált rendszerben az oldat sűrűsége  $1002.2$  és  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  között változhat.

Munkámban elsőként a méretcsökkentéssel foglalkoztam. A métercsökkentés során minden esetben az ipari és a laboratóriumi berendezés között az átlagos

## Bevezetés

tartózkodási időt vettem állandónak. A geometriai paraméterek meghatározásához több lehetőséget tanulmányoztam.

Dolgozatomban az egységugrás zavaró függvényre adott válasz függvényeket tanulmányoztam az általam vizsgált, méretcsökkentett berendezésekben. Valamint vizsgáltam a szívó és nyomó csomópont pozíciójának hatását a tartózkodási idő eloszlás függvények alakjára, a tartózkodási idő várható értékére, hold-back értékre, holtidőre valamint a holt térfogatra.

Az iparban előfordulnak különleges geometriájú tartályok is, melyek több hengerelemből állnak. A geometria hatásainak megfigyelése céljából megvizsgáltam a hengerelemek számának (1-3-5 db) hatását a homogenizálás hatékonyságára.

A keverés részletesebb megismeréséért a laboratóriumi berendezéseket leképeztem áramlási szimulátorban is.

A méretcsökkentés-növelés helyességének igazolásáért a kísérleti berendezésemet nagy laboratóriumi méretben is megépítettem, majd kísérleteket végeztem benne.

### 1 Irodalom

Fluidumoknak nevezzük azokat az anyagokat, melyek nyírófeszültség hatására folyamatosan deformáción mennek keresztül [1]. A feszültség nagysága a szögtorzulás mértékétől függ. Különböző fluidumok más és más összefüggést mutatnak a nyíró feszültség és a deformáció mértéke között, ez alapján a fluidumokat két nagy csoportba sorolhatjuk, a Newtoni- és a nem-Newtoni fluidumokba. A Newtoni fluidumok azok, melyek esetében a nyíró feszültség lineáris összefüggést mutat a deformáció mértékével. Az arányossági tényező a dinamikai viszkozitás ( $\mu$ , [ $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ]). Általános példa a Newtoni-folyadékokra a levegő és a víz. A nem-Newtoni fluidumok esetén a nyíró feszültség és a torzulás mértéke között változó arányossági tényező van. Nem-Newtoni fluidumok például a műanyagok, kolloid-szuszpenziók és az emulziók. A nem-Newtoni közegek tudománya a reológia [2].

A fluidumokat összenyomhatóság szempontjából két csoportba sorolhatjuk. Azokat a fluidumokat, melyek térfogata áramlás során nem változik, folyadékoknak nevezzük. Azokat a fluidumokat, melyek kompresszibilisek, gázoknak nevezzük.

Az áramlási mező leírásához meg kell határozni az egyes fluid részecskék sebességét és gyorsulását különböző időben és a fluidum által kitöltött tér különböző pontjaiban. A mozgás elemzés egyik módja, ha felrajzoljuk a fluidum sebességterének áramvonalait. Az áramvonal a fluidum sebességvektorainak érintője. Abban az esetben, mikor a tér adott pontján áthaladó fluidum elemek érdekelnek bennünket, akkor a nyomvonalat kapjuk meg. Stacionárius sebességter esetén az áramvonalak és nyomvonalak egybe esnek, míg időben változó sebességter esetben általában különböznek [1, 2].

A fluidumok jellemzésére még további két fogalmat vezettek be. Ideális fluidumnak nevezzük azt, mely homogén, súrlódásmentes ( $\mu = 0 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) illetve összenyomhatatlan ( $\rho = \text{konstans kg m}^{-3}$ ). Valóságos folyadék, amely molekuláris szerkezetű, súrlódásos ( $\mu \neq 0 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) és összenyomható ( $\rho \neq \text{konstans}$ ). Annak ellenére, hogy a valóságos folyadékok viszkózusak számos olyan áramlási probléma van, mely esetén a viszkozitás elhanyagolható. A következő fejezetben olyan ideális folyadékokra jellemző összefüggéseket mutatok be, melyek

## Irodalom

meghatározott körülmények között alkalmazhatók reális folyadékok leírására is [2, 3].

### 1.1 Fluidumok mozgása

Vegyipari folyamatokban célunk a műveleti egységbe bevitt anyagon, fázison valamilyen változás előidézése. A változás azonban csak úgy következhet be, ha a fázishoz anyagot, komponenst, energiát vagy mozgásmennyiséget adunk. Ezek a mennyiségek extenzív mennyiségek, így megmaradási tételek írhatók fel rájuk.

A mechanikában alapvetően két vizsgált objektumot különböztetünk meg. Az egyiket rendszernek (system) nevezzük, mely állandó, jól meghatározható tömeggel rendelkezik. A rendszer fogalmát leginkább a szilárd-test mechanikában szokták alkalmazni, hiszen ott könnyen meghatározható a vizsgált szilárd test tömege. A fluid mechanikában azonban inkább a térfogat (control volume) a vizsgált objektum. Ez a térfogat egy tetszőleges térfogat, abban a térben, amelyben a fluidum áramlik [4].

A fluidumban lévő elemek mozgása kétfajta megközelítéssel írható le. Az egyik a Lagrange-féle módszer. Ebben az esetben a megfigyelendő objektumhoz rögzített koordináta-rendszerünk van, így annak helye időben változik. A fluid mechanikában szívesebben használják az Euler-féle módszert, melyben a koordináta-rendszer a tér egy adott pontjához van rögzítve és ahhoz képest figyeljük meg a fluid elem mozgását. A sebességkomponensek (1-1), így az idő függvényében kifejezhetők.

$$\begin{aligned} u &= f_1(x, y, z, t) & v &= f_2(x, y, z, t) & w &= f_3(x, y, z, t) \\ \mathbf{v} &= (u, v, w) \end{aligned} \tag{1-1}$$

Az x-irányú sebesség megváltozását az 1-2 egyenlet írja le.

$$du = \frac{\partial u}{\partial t} dt + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + \frac{\partial u}{\partial z} dz \tag{1-2}$$

A fluid elem elmozdulása dt idő alatt pedig kifejezhető az 1-3 összefüggésekkel.

$$dx = u dt, \quad dy = v dt, \quad dz = w dt, \tag{1-3}$$

Az 1-2 egyenletet elosztva dt-vel és behelyettesítve az 1-3 egyenlet tagjait a sebesség totális deriváltját, más néven a szubsztanciális deriváltját kapjuk, azaz a fluid elem x irányú gyorsulását (1-4).



## Irodalom

$$a_x = \frac{du}{dt} \equiv \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad 1-4$$

A másik két irányban (1-5 egyenlet) a gyorsulás az 1-4 egyenlet alapján felírható [2, 5].

$$a_y = \frac{dv}{dt} \equiv \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$$
$$a_z = \frac{dw}{dt} \equiv \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \quad 1-5$$

Három alapvető fizikai törvény van, amelyek, a relativisztikus és nukleáris jelenségek kivételével, minden áramlástanai jelenségre alkalmazhatók, függetlenül az áramló fluidum tulajdonságaitól.

Az alapvető fizikai törvények közül a tömegmegmaradás törvényét a kontinuitási egyenlet írja le. Az impulzus leírásához Newton második törvényét, míg az energia meghatározásához a termodinamika első törvényét alkalmazzuk [6].

A fluidumra alapvetően kétféle erő hat. Az egyik a térerő, mely a fluid térfogat minden pontjára hat közvetítő közeg nélkül is. A leggyakoribb térerő a gravitációs erő. A másik erő a felületi erő, melynél szükség van közvetítő közegre, erre példa a súrlódási erő. A felületi erő értelmezéséhez szükség van a kontinuitás feltételezésére [1, 6]. A folyadék részecskék, molekulák egyedi mozgásának leírása összetett, nehéz feladat lenne, mely túlmutat jelen lehetőségeinken. A mérnöki területen általánosságban a fluidumok makroszkopikus viselkedésével foglalkoznak, így a fluidumra, mint folytonos, egyenletes eloszlású közegre tekintenek. A kontinuum megközelítés abban az esetben érvényes, mikor a legkisebb vizsgált fluidum térfogat is tartalmaz elegendő számú molekulát, hogy ott statisztikai átlagokat számolhassunk. A kontinuitás feltételezésének érvényessége inkább a megszerezni kívánt információ típusától függ, mint a fluidum alapvető tulajdonságaitól. A fluidum makroszkopikus tulajdonságai pontról-pontra folytonosan változnak.

A sűrűség a kontinuumot jellemző intenzív mennyiség. A sűrűség egy adott pontban (1-6), a kontroll térfogatban ( $\Delta V$ ) lévő tömeg ( $\Delta m$ ) és a kontroll térfogat hányadosa.

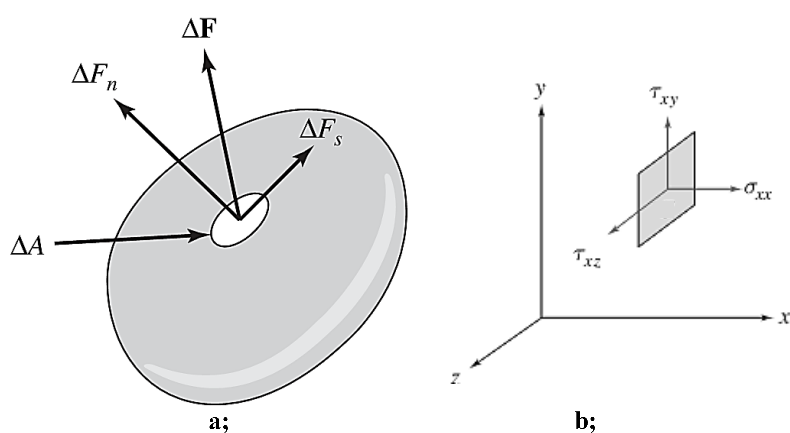
$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \delta V} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad 1-6$$

## Irodalom

Csökkentve a térfogatot ( $\Delta V \rightarrow \delta V$ ), a sűrűség egyre inkább arra a pontra lesz jellemző, amelyet a kontrolltérfogat körülölel, ez biztosítja a kontinuitást a fluid térfogatban. A sűrűség egy adott pontban továbbá az idő függvénye is (1-7) [4].

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad 1-7$$

Tekintsünk egy  $\Delta \mathbf{F}$  erőt, mely egy  $\Delta A$  felületre hat. Ez a  $\Delta \mathbf{F}$  erő felbontható két komponensre, az egyik merőleges ( $\Delta F_n$ ), míg a másik párhuzamos ( $\Delta F_s$ ) az adott felülelemre (1. ábra). Az egységnyi felületre ható erő, a feszültség, azzal a feltételezéssel, hogy  $\Delta A \rightarrow \delta A$ , ahol  $\delta A$  az a legkisebb felület, melyen még statisztikai átlag értelmezhető [6].



1. ábra:  $\Delta A$  felületre a; ható erők [6] és b; feszültségek [4]

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow \delta A} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \quad 1-8$$

$$= \lim_{\Delta A \rightarrow \delta A} \frac{\Delta F_s}{\Delta A} \quad 1-9$$

Az 1. ábra a; részében valamin az 1-10 egyenletben szereplő indexek közül az első index a vizsgált felülelem normálisának irányára utal, a második pedig a feszültség irányát jellemzi. Mivel ahhoz, hogy az adott erő hasson a testre, felületre van szükség, így ezeket a feszültségeket (1-8, 1-9), felületi feszültségeknek nevezzük.

Egy pontra ható feszültségnek kilenc komponense van, melyek közül a  $\sigma$  a normális feszültséget, míg a  $\omega$  a csúsztató feszültséget jelöli (1-10) [5]. A feszültség mindig ellenkező értelmű, mint az őt kiváltó erő.

## Irodalom

$$\begin{array}{ccc} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{array} \quad 1-10$$

A nyomás alapvető paraméter a fluid statikában. A nyomáskülönbség hajtóereje a fluidumok mozgásának, azonban nyugalomban lévő fluid elemre is hat nyomás, mégpedig a hidrosztatikai nyomás, mely felületi erő, hiszen a vizsgált fluid elem fölötti fluid térfogattól függ a nagysága. Szabad fluid felszínre ható hidrosztatikai nyomás megegyezik az atmoszférikus nyomással. Nyugalomban lévő fluidumra nem hat nyíró feszültség, így a fluidum elemre csak a gravitációs illetve a nyomó erő hat. A fluidumra ható hidrosztatikai nyomás (1-11) megegyezik az átlagos normális feszültséggel [5].

$$P_h = -\frac{1}{3}\bar{\sigma} = -\frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad 1-11$$

A fluidumhoz rögzített koordináta-rendszerben makroszkopikus mozgások nem figyelhetők meg. Ebben az esetben egy elemi fluidum kockára felírt erőegyensúlynál csak a nyomóerőt illetve a térerőt kell elszámolni (1-12). Nyugalomban az elemi testre ható erők egyensúlyban vannak, vagyis az erők összege valamennyi irányban zérus [1].

$$\rho \mathbf{g} = \frac{\partial P}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial P}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial P}{\partial z} \mathbf{e}_z = \text{grad}P = \nabla P \quad 1-12$$

Az  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$ ,  $\mathbf{e}_z$  az  $x, y, z$  irányba mutató egységvektorok, míg a grad alias  $\nabla$  egy skalármezős irányderivált operátor, mely megadja a skalármező legnagyobb megváltozásának irányát. A skalár mező gradiense vektormezőt ad [6].

### 1.1.1 Kontinuitási-tétel

A sebesség és sűrűség a helytől és időtől is függő mennyiségek, így a tér három irányában a tömeg áram változásainak összege meg kell egyezzen a fluid elem teljes térfogatában történő tömeg változásával (1-13, 2. ábra).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho dx dy dz) = & -\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) dy dz dx - \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) dx dz dy \\ & - \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) dx dy dz \end{aligned} \quad 1-13$$

Mivel a vizsgált fluid elem térfogata időben állandó, így a  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  tagok elhagyhatók.

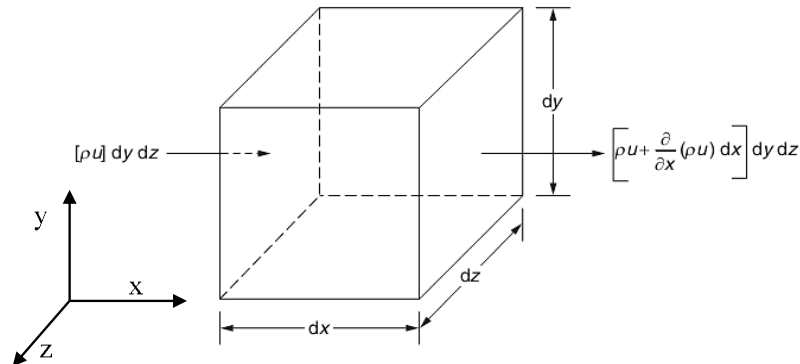
## Irodalom

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \quad 1-14$$

Az 1-14 egyenlet felírható a sűrűség szubsztanciális deriváltjával (1-15) is.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} \quad 1-15$$

Az 1-14 és 1-15 egyenletek az általános formája a 3 dimenziós kontinuitási egyenletnek instacionárius áramlás esetén [2].



**2. ábra: Differenciális folyadéktérfogat a tömegmegmaradás szemléltetéséhez [2]**

Amennyiben a fluidum összenyomhatatlan, a térfogatváltozás zérus, így az 1-15 egyenlet jobb oldali tagja zérus lesz. A kontinuitási egyenlet, mind stacionárius, mind instacionárius fluidum esetén az 1-16 egyenletre egyszerűsödik le [6].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 1-16$$

### 1.1.2 Impulzus egyenlet

A viszkozitás a fluidumok egy olyan tulajdonsága, amely megmutatja, hogy adott nyírófeszültség hatására a fluid elem mekkora torzulást szenved el. A viszkozitás a molekuláris kölcsönhatások miatt létezik a fluidumban. Minél erősebbek az adott fluidum intermolekuláris kölcsönhatásai, annál nagyobb a viszkozitása és annál inkább ellenáll a deformációnak [5].

A nyírási tényező megegyezik a nyíró feszültség és a deformáció hányadosával elasztikus szilárd halmazállapotú anyagok esetén. Newton-viszkozitás törvénye kimondja, hogy a fluidum párhuzamos, lamináris áramlás esetén hasonlóan viselkedik. Egy x-tengellyel párhuzamos áramlás deformálni fogja a fluid elemet,

## Irodalom

amennyiben az elem teteje és alja között sebességkülönbség van. A csúsztató feszültség és a deformáció mértékének hányadosa a viszkozitással egyenlő. A fluidum egy pontjában a deformáció mértéke  $-\frac{d\delta}{dt}$ , mely megegyezik  $\frac{dv}{dy}$ -vel (1-17). A viszkozitás anyagi tulajdonság, függ a nyomástól és hőmérséklettől, azonban nem függ a deformáció mértékétől.

Azon fluidumokat, melyekre érvényes a lineáris összefüggés a deformáció mértéke és nyírófeszültség között Newtoni-fluidumoknak nevezzük [6].

$$\omega = \mu \frac{dv}{dy} \quad 1-17$$

Newton-féle viszkozitás törvény azonban csak párhuzamos, lamináris áramlás esetén érvényes. Stokes megalkotta a viszkozitás törvényt három dimenziós, lamináris áramlás esetére is (1-18).

$$\begin{aligned} \omega_{xy} = \omega_{yx} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \omega_{yz} = \omega_{zy} &= \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \omega_{zx} = \omega_{xz} &= \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad 1-18$$

A normál feszültség két tagból tevődik össze, az egyik a nyomás (1-12), a másik viszkozitás tag. Hook elasztikus szilárd halmazállapotú anyagokra vonatkozó törvénye alapján a viszkozitási tag fluidumokra is levezethető (1-19 egyenlet jobb oldali első tagja). A normál feszültség három dimenziós alakjait lamináris áramlásra a 1-19 egyenlet mutatja, azzal a kiegészítéssel, hogy a nyomás negatív értéke egyenlő az átlagos normál feszültséggel (1-11) [2, 6].

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \right) - P \\ \sigma_{yy} &= \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \right) - P \\ \sigma_{zz} &= \mu \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \right) - P \end{aligned} \quad 1-19$$

A vizsgált térfogat impulzus mérlegének felírása Newton második mozgás törvényén alapszik, mely kimondja, hogy

## Irodalom

„A vizsgált rendszer impulzus megváltozásának nagysága egyenlő a rendszerre ható erők összegével és iránya megegyezik a rendszerre ható erők eredőjével.”

A vizsgált fluidum térfogat impulzus megváltozására a Navier-Stokes egyenletet írhatjuk fel, mely a Newton második mozgás törvényének a differenciális formája (1-20).

$$\begin{aligned}\rho \frac{Du}{Dt} &= \rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial \omega_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= \rho g_y + \frac{\partial \omega_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \omega_{zy}}{\partial z} \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= \rho g_z + \frac{\partial \omega_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \omega_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\end{aligned}\tag{1-20}$$

Alkalmazva Stokes-féle viszkozitási (1-18,1-19) tételt a Navier-Stokes egyenlet általános formáját kapjuk lamináris áramlás esetére [2, 6].

$$\begin{aligned}\rho \frac{Du}{Dt} &= \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{v} \right) + \nabla \cdot \left( \mu \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} \right) + \nabla \cdot (\mu \nabla u) \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{v} \right) + \nabla \cdot \left( \mu \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} \right) + \nabla \cdot (\mu \nabla v) \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{v} \right) + \nabla \cdot \left( \mu \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \right) + \nabla \cdot (\mu \nabla w)\end{aligned}\tag{1-21}$$

### 1.2 Keverés folyamata

Az extenzív mennyiség mozgásának azt a részét, mikor a mozgás az anyag makroszkopikus mozgásából ered konvektív áramnak nevezzük. A konvektív áram létezésének oka a közeg mozgása, melynek oka, hogy azt valamikor mozgásba hoztuk. A mozgás lassulását, megszűnését okozó erőket pedig valamilyen külső erővel kompenzáljuk.

Abban az esetben, mikor a fluid mozgást külső erővel hozzuk létre, akkor kényszer konvekcióról beszélünk, ez esetben a nyomáskülönbséget vagy a nehézségi erőt használjuk fel az anyag mozgatására. A két erő hasonló áramlásteret kelt azzal a különbséggel, hogy a nyomáskülönbség közelható erő, míg a gravitáció távolható erő. Stacioner állapot akkor áll be, mikor a külső eredetű mozgóerő és a belső súrlódás egyenlő, így egyenletes mozgás jön létre. Abban az esetben, mikor görbe vonalú az áramlás, akkor természetesen az irányváltoztatáshoz is erőt kell befektetni a súrlódás leküzdése mellett [7].

## Irodalom

Szabad konvekció esetén az áramlást nem külső erők, hanem a fluid közegben sűrűségkülönbség miatt ébredő felhajtó erők okozzák. Sűrűségkülönbség kialakulhat koncentrációkülönbség vagy hőmérsékletkülönbség miatt is.

Abban az esetben, ha a vizsgált fázis két pontján koncentrációkülönbség van, azt a rendszer igyekszik kiegyenlíteni. A kiegyenlítési folyamatok intenzitása egyenlő az inhomogenitások mértékével. A kiegyenlítődési folyamatok miatt az extenzív mennyiségek az alacsonyabb potenciálú hely felé áramlanak. Az extenzív mennyiségek ezen áramát vezetéssel (konduktív) áramnak nevezzük [7].

A különböző sebességű vagy koncentrációjú elemek mozgása keverési effektusokat idéz elő. A fent leírtak alapján a keverés két alapfolyamatból tevődik össze, az egyik a fluidum elemek konvektív áramlása (makroszkópikus keverés), a másik a molekuláris diffúzió (mikroszkópikus keverés), melyet a molekuláris diffúziós tényezővel jellemezhetünk ( $D_A$ ).

Tekintsünk egy rendszert, melyben nincs kémiai reakció. A rendszerben az „A” komponens koncentrációja ( $c_A(x,t)$ ) az 1-22 egyenlet szerint fog alakulni [8, 9].

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = \frac{\partial c_A}{\partial t} + u \nabla c = D_A \Delta c_A \quad 1-22$$

Abban az esetben mikor nincs molekuláris diffúzió a rendszerben ( $D_A=0$ ) azt tapasztaljuk, hogy a koncentráció a fluid elemeket jellemzi csak és nem oszlik szét a körülötte lévő fluid térfogatban, azaz valójában nincs keveredés. A konvekciós áram csak „szállítja” a fluid elemeket anélkül, hogy azok összetétele megváltozna.

A fluid elemeken belül a koncentráció megváltoztatása egyedül molekuláris diffúzió útján valósulhat meg. Abban az esetben, hogy ha a fluid elemek mérete kisebb az gyorsítja a molekuláris diffúzió folyamatát. A keverés önmagában abban segít, hogy a fluidumot kisebb fluid elemekre bontja, melyben már érvényesülhet a molekuláris diffúzió. A molekuláris diffúzió hatására a koncentráció homogenizálódik a teljes fluid térfogatban.

A makroszkópikus keverés a turbulencia következtében létrejövő konvektív transzport következménye, mely a fluidum elemeket szállítja, továbbá a fluid térfogatot kisebb fluidum elemekre bontja. A makroszkópikus keverés esetén meg kell még említeni a diszperziós folyamatot, mely a kis méretű fluid elemeket oszlatja el a teljes fluid térfogatban [8, 9].

## **Irodalom**

Nagy méretű tartályok esetén továbbá olyan tartályokban, melyekben a keverést nem dinamikus keverőkkel oldják meg feltételezhetjük, hogy az áramlás a lamináris tartományban van a betáplálási és elvételi csonkok közvetlen környezetét leszámítva. A turbulencia hiánya miatt ilyen esetben arra kell törekednünk, hogy minél nagyobb legyen a tartály teljes térfogatára kiterjedő cirkuláció, így vékonyítva, torzítva a folyadék elemeket. Ezt a lehető legnagyobb nyíró feszültségeken keresztül valósíthatjuk meg. A sebesség különbségek ugyanis nyújtják, vékonyítják a folyadékelemeket, amelyek ha eléggé elvékonyulnak a diffúzió számára is átjárhatóvá válnak, így a koncentráció kiegyenlítő hatás a molekuláris diffúzióknak köszönhetően érvényesül [7].

### **1.3 Folyadékok keverése**

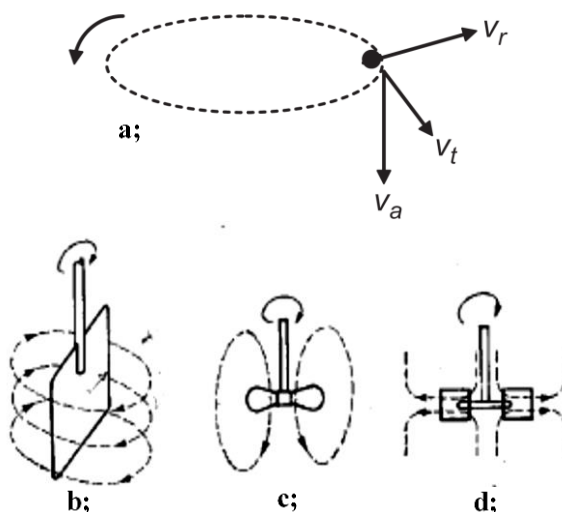
A keverés egy elegyítési folyamat, mely során két vagy több, egymástól különböző tulajdonságú anyagot úgy kell egyesíteni, hogy az egyes alkotók eloszlása a kívánt keverési aránynak feleljen meg. A keverés elsődleges célja, homogén rendszer előállítás, másodlagos cél lehet az anyag- és vagy a hőátvitel intenzifikálása. A keverés tulajdonképpen külső mechanikai energia befektetés révén történő koncentráció kiegyenlítődés [10].

#### **1.3.1 Dinamikus keverők**

Folyadékok keverésére többnyire függőleges keverőtengelyre felszerelt forgólapátokat alkalmaznak. Abban az esetben, mikor egy álló hengeres tartályban, a tartály közepére elhelyezett keverő által gerjesztett áramlási képet vizsgálunk, akkor három alapáramlást tapasztalunk (3. ábra b; c; d;), mely a három alapvető sebesség komponens (3. ábra a;) hatására jön létre [11].



## Irodalom



**3. ábra: A dinamikus keverők által keltett sebesség komponensek (a;  $v_a$ : axiális sebesség,  $v_t$ : tangenciális sebesség,  $v_r$ : radiális sebesség) [11] és áramlási képek (b; síklapátos keverő c; propeller keverő d; turbinakeverő) [10]**

A sugár irányú sebesség komponens ( $v_r$ ) a folyadékot a tartály fala felé tolja, a tengely irányú ( $v_a$ ) függőleges irányban mozgatja a folyadék elemeket, míg a tangenciális sebesség komponens vízszintes felületen kelt körkörös mozgást (3. ábra a;). Az axiális és sugár irányú sebességek elmozdítják egymáshoz képest az elemeket, így okozva keverést. A tangenciális sebesség komponens nem generál jelentős keverést, csak örvényeket képez.

Valódi keverőkkel gerjesztett áramlás, ezen három alapáramlásból tevődik össze. A keverés hatékonyságát a következőkkel lehet javítani anélkül, hogy a keverő fordulatszámát növelnénk:

- áramlástörők beépítése,
- a keverő elmozdítása a tartály középpontjából,
- több keverő beépítése, melyek egymáshoz képest ellenkező irányba forognak [11].

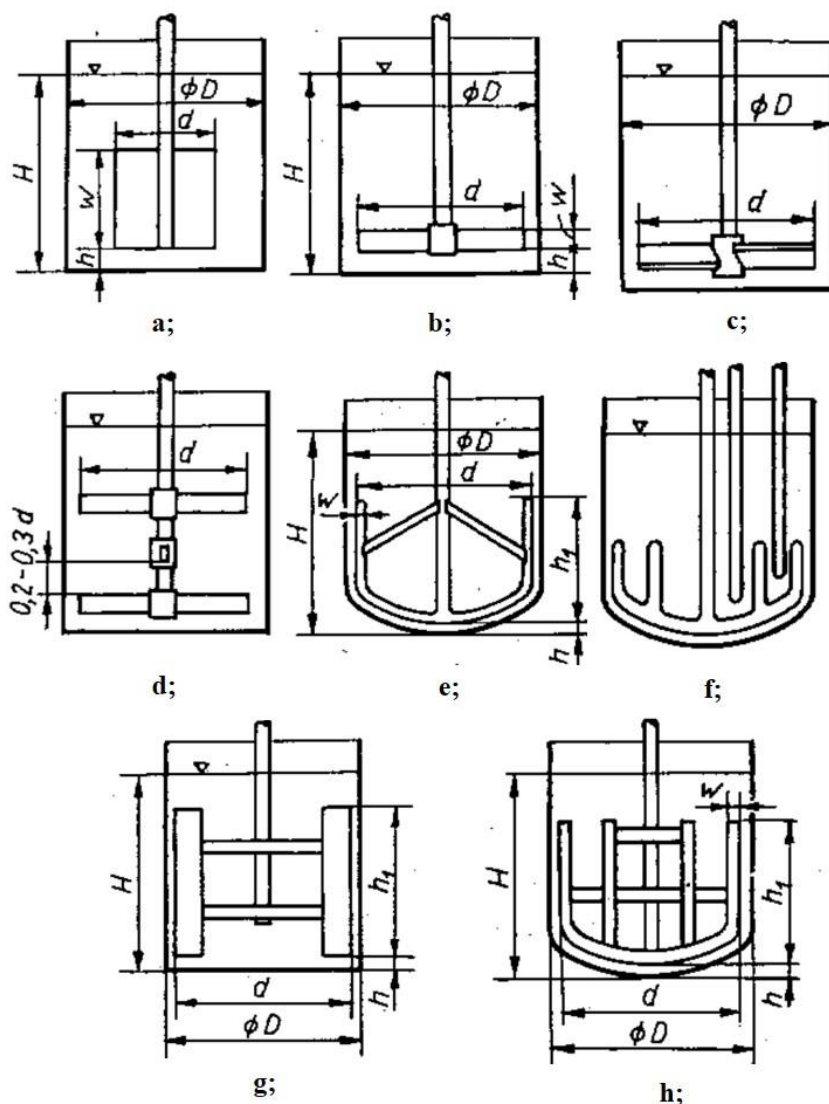
Síklapátos keverők tangenciális áramlást (3. ábra b;) keltenek. Axiális áramlási képet propeller keverő okoz (3. ábra c;), míg a turbinakeverő sugárirányú áramlást generál (3. ábra d;) [10].

## Irodalom

Az áramlástörőket általában turbulens vagy átmeneti tartományban alkalmazzák. Áramlástörőket nem építik be olyan reaktorokba, tartályokba, melyeket gyakran kell tisztítani. Lamináris áramlási tartományban illetve viszkózus folyadékok esetén sem szükséges a plusz elemek használata. Olyan tartályok esetén, melyek négyszög alapúak a sarkok átveszik az áramlás török szerepét, így ebben az esetben sem kell alkalmazni azokat. Az áramlás törőket a tangenciális áramlásba helyezik el, mely hatására vertikális áram gerjed. A vertikális áramnak köszönhetően a tartály alja és teteje között jön létre keveredés anélkül, hogy örvénylést hozna létre, mely megvédi a tartály tartalmát a levegőtől. Az áramlástörők alkalmazásának számos előnye mellett számolni kell azzal, hogy hatásukra megnő a keverő ellenállása, teljesítmény igénye [12].

### 1.3.1.1 Tangenciális áramlást keltő keverők

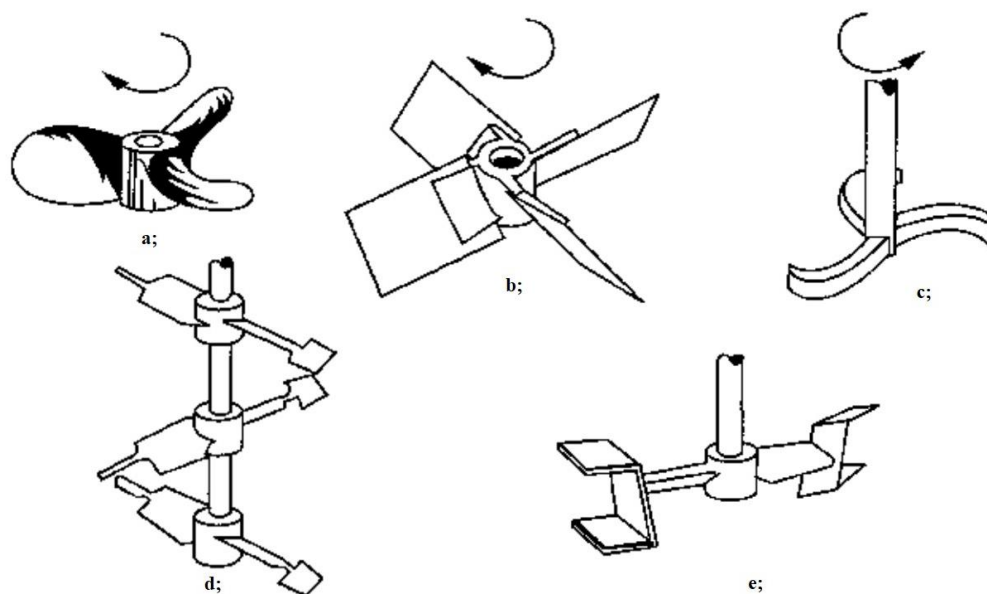
A síklapátos keverők a legegyszerűbb keverők (4. ábra). A lapátok általában párhuzamosak a forgótengellyel, így a tangenciális áramlási kép a jellegzetes áramlás. A fordulatszámuk alacsony, 20-40  $\text{min}^{-1}$ , de minden esetben 100  $\text{min}^{-1}$  alatti. A lapkeverőt (4. ábra a;) és karos keverőt (4. ábra b;) általában kis viszkozitású folyadékok esetén, szuszpenziók kiülepedésének megakadályozására és hőátadás javítására alkalmazzák. A ferdén elhelyezett lapátokkal (4. ábra c;) enyhe axiális áramlás is elérhető. A horgony keverőket (4. ábra e;) nagyobb viszkozitású ( $100 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) oldatokhoz is alkalmazzák továbbá olyan esetben, mikor a tartály feneke gömbölyű, így a keverő a tartály aljához tud idomulni [10, 11].



4. ábra: Síklapátós keverők (a; lapkeverő b; karos keverő c; ferde lapátú karos keverő d; több karú karos keverő e; horgony keverő (ankerkeverő) f; ujjkeverő g;h; kalodás keverő [10]

### 1.3.1.2 Axiális áramlást keltő keverők

Az axiális áramlást keltő keverőket folyadékok, szuszpenziók keverésére, gáz diszpergálásra alkalmazzák leggyakrabban. A legrégebbi axiális áramlást keltő keverő a propeller keverő (5. ábra a;). A propeller keverők mértani csavarfelületek, melyek alakilag a hajócsavarokhoz hasonlítanak. Keverésre 2, 3 vagy 6 szárnyú propellert alkalmaznak. Aránylag nagy,  $150-1600 \text{ min}^{-1}$  fordulatszámmal alkalmazzák.  $1$  és  $10 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  viszkozitásig használják ezeket a keverőtípusokat [12].



**5. ábra: Axiális áramlást keltő keverők (a; propeller keverő, b; döntött lapátú turbina keverő, c; Pfaudler-féle keverő, d; MIG keverő (Ekato Holding GmbH.), e; INTERMIG keverő (Ekato Holding GmbH.) [12]**

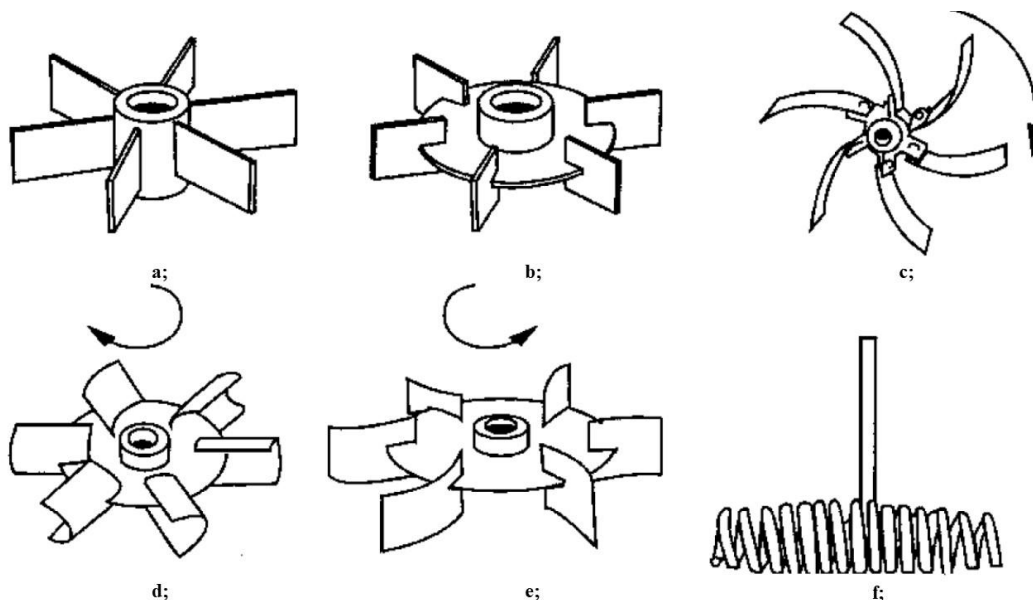
A döntött lapátú keverők (5. ábra b;) esetén, a lapátok és a horizontális sík által bezárt szög  $10-90^\circ$  közé esik (általában  $45^\circ$ ). A lapátok döntésszögének köszönhetően mind axiális mind radiális áramlás kialakul, ez viszkózusabb anyagok esetén hatékonyabb keverést eredményez. A Pfaudler-típusú (5. ábra c;) keverő volt az első, mely üveg bevonatot kapott, így korrozív folyadékok keverésére is alkalmassá vált. A MIG és INTERMIG keverők nagy viszkozitású folyadékok keverésére alkalmasak (5. ábra d; e;) [12].

### 1.3.1.3 Radiális áramlást keltő keverők

A radiális áramlást keltő keverőket (6. ábra) általában kis és közepes viszkozitású oldatok keveréséhez használják, nagy fordulatszámon (több száz  $\text{min}^{-1}$ ). Az axiális keverőkhöz képest nagyobb nyíró feszültséget és turbulenciát keltenek kisebb teljesítmény igény mellett. A keverőlapátok kialakítása miatt a gerjesztett áramlás a tartály fala felé irányul, és jelentős a tartály fenéke és teteje felé irányuló fluid mozgás is, mely tovább intenzifikálható áramlástörők elhelyezésével. A keverők 4 vagy több sík vagy hajlított lapátot tartalmaznak. A megfelelő radiális áramlás kialakulásához szükséges egy tányér beépítés a keverőbe

## Irodalom

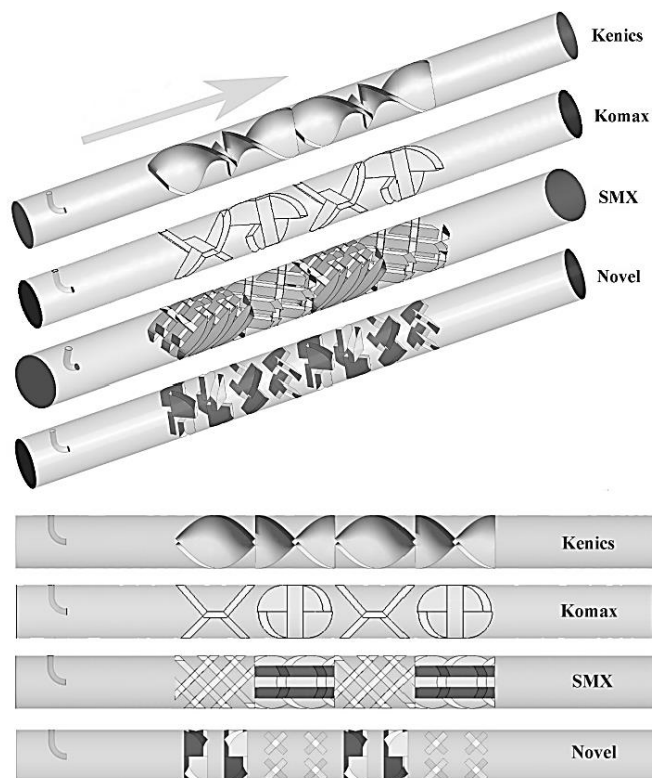
(pl.: Rushton-turbina keverő). A keverők kialakítása hasonlít a centrifugál szivattyúkéhoz. A radiális keverőket mind egy mind több fázisú rendszerek keverésére használják. Alkalmasak tömeg transzportra (pl.: oxigén transzport fermentorban) és fázis diszperzióra (pl.: emulgeálás, homogenizálás) [12].



**6. ábra: Radiális áramlást keltő keverők a; nyitott, sík lapátos turbó keverő, b; Rushton turbina c; nyitott lapátú keverő d; Scaba SRGT CD6 (Smith) típusú turbókeverő e; nyitott lapátú, tányéros keverő f; rugós keverő [12]**

### 1.3.2 Statikus keverők

A statikus keverők (7. ábra) alkalmazása folyamatos műveletekben mára általánosan elterjedt az iparban. Ezen keverő típusoknak alacsonyabb az energia és karbantartási igénye, mint a dinamikus társaiké, mivel nem rendelkeznek mozgó alkatrészszel. A statikus keverők egyforma elemek sorozatából épülnek fel, melyek beépíthetők csővezetékbe, reaktorokba és oszlopokba is. A keverő elemek célja, hogy a folyadékot a fő áramlás irányára átlósan oszlassa szét. Általánosan elmondható, hogy a statikus keverők a dinamikus keverőkhöz képest kisebb helyigényűek, alacsony beruházási költségűek, ugyanakkor kisebb a fluidum tartózkodási ideje és kis nyírófeszültség mellett is nagy a keverési hatékonyság [13].



7. ábra: Kenics, Komax, SMX és Novel típusú statikus keverők [14]

### 1.3.3 Buborékolatók

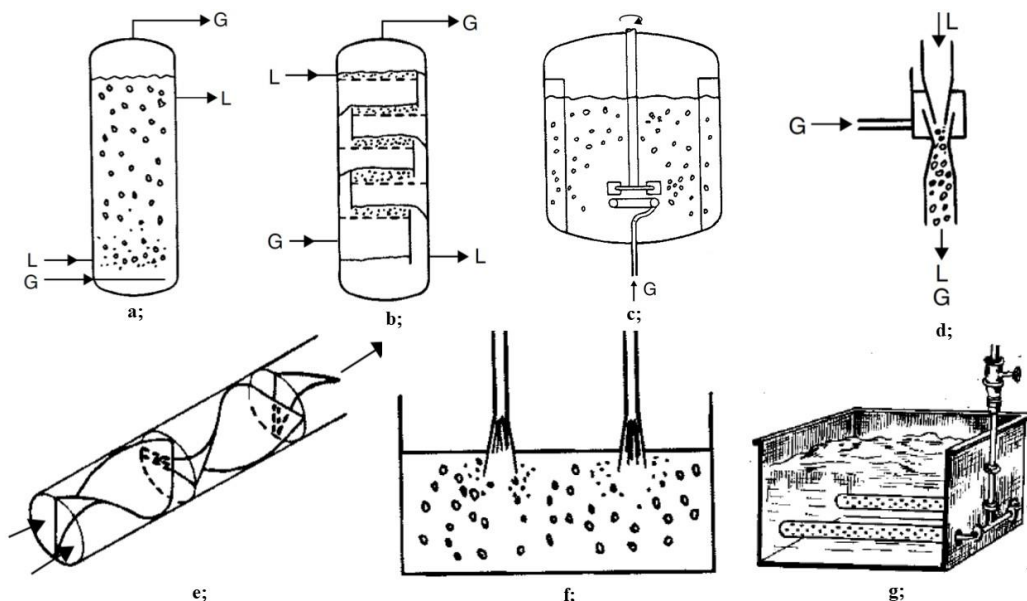
Számos olyan vegyipari, környezetvédelmi, élelmiszeripari folyamat van, melyben gázokat alkalmaznak reakció- (pl. hidrogénezés [15]) vagy szeparációs ágensként (pl. flotálás [16]). Ezekben az esetekben a legfontosabb feladat a gáz hatékony érintkeztetése a folyadékkal. A gáz nem csak reakció partnerként vesz részt a folyamatokban, hanem keverést is biztosít. A flotálás egy széles körben alkalmazott szeparációs technika a szennyvíztisztítás, ásványi anyag dúsítás, fermentáció és műanyag újrahasznosítás területén. A folyadékfázisból a finom részecskék, olaj cseppek, szennyezők eltávolítása a folyadék-gáz keverék hidrofíli-hidrofób tulajdonságán alapszik. A gáz buborékok hozzá tapadnak a hidrofób tulajdonságú anyagokhoz és a folyadék felszínén dúsítja azokat. A folyamat hatékonysága nagyban függ a gáz buborékok átmérőjétől és a Reynolds-számtól<sup>1</sup> [18]. A fermentáció során a biokémiai folyamatoknak köszönhetően CO<sub>2</sub> gáz is

<sup>1</sup> Reynolds-szám: dimenziómentes, hasonlósági szám.  $Re = \frac{v \cdot L}{\nu}$  Ahol, Re Reynolds-szám [-], v áramlási sebesség [ m s<sup>-1</sup>], L jellemző hossz méret [m],  $\nu$  kinematikai viszkozitás [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>] [17]

## Irodalom

képződik. A fermentorokban, így a keverést nem csak a külső erővel létrehozott áramlás, hanem a keletkezett gázbuborékok mozgása is biztosítja [19, 20]. A szennyvíziszap feldolgozás során a rothasztókban az iszap mozgását és a keveréshez szükséges energiát nagyrészt a gázbevezetés biztosítja. Ebben az esetben is kulcsfontosságú a gáz és a folyadék (iszap) fázis hatékony érintkeztetése [21]. A környezetvédelmi és vegyipari szempontból nélkülözhetetlen abszorpciós eljárás során is az a cél, hogy minél nagyobb fajlagos felületű gáz buborékokat hozzanak létre a hatékony komponens átadás kedvéért [22]. A gázokkal történő eljárások energiát biztosítanak a folyadékok keveréséhez, a felhajtó erő, a buborékok összeesése és a gáz expanzió következtében. Általánosságban elmondható, hogy ezt a fajta műveletet alacsony viszkozitású folyadékok esetén alkalmazzák, mikor is turbulens áramlást tudnak generálni. Nagy térfogatok esetén a jellemző gáz bevezetés, a tartály, reaktor alján elhelyezett gázelosztóval történik (8. ábra a; b; g;). Kisebb reaktorokban a gáz bevezetés a keverő elem alatt elhelyezett gyűrű alakú gázelosztóval történik. Ebben az esetben az gáz diszpergálását segíti a keverő elem, mely aprítja a gázbuborékokat és így hozza létre a nagyobb fázisérintkezési felületet (8. ábra c;). Statikus keverők (8. ábra e;) esetén a gáz bevezetés axiális irányban elhelyezett csonkon történik. Adott esetben a gáz nyomás nem elegendő a megfelelő áramláshoz, ebben az esetben ejektort (8. ábra d;) vagy porlasztót (8. ábra f;) alkalmaznak [12].

## Irodalom



**8. ábra: Gáz-folyadék érintkeztető berendezések alacsony viszkozitású folyadékokhoz a; buborék kolonna, b; tányéros kolonna, c; kevert tartály d; gáz-folyadék ejektor, e; statikus keverő, f; bemerülő porlasztó, g; pneumatikus porlasztó (L: folyadék fázis, G: gáz fázis) [12]**

### 1.3.4 Rétegződésre hajlamos elegyedő folyadékok keverése

Elegyedő folyadékoknak nevezzük azokat a folyadékokat, melyek polaritása megegyezik. Két elegyedő folyadék érintkeztetésekor spontán keveredési folyamat indul a diffúziós komponens transzportnak köszönhetően. Eredményül, a rendszer a kezdeti nem egyensúlyi állapotból termodinamikai egyensúlyba kerül, azonban ez a folyamat spontán módon nagyon hosszú idő alatt valósul meg [23]. A természetben számos esetben előfordul, mikor az éles sűrűségkülönbségnek köszönhetően rétegzett, elegyedő fluidum rendszerek alakulnak ki. Ezek a különböző sűrűségű rétegek akár eltérő áramlási tulajdonsággal is rendelkezhetnek pl. az óceánokban a hideg-meleg vízrétegek esetén a felső vízrétegben a hűlés hatására turbulencia alakulhat ki. A folyók óceánokba, tengerekbe ömlésekor a torkolatokban az eltérő só koncentráció miatt alakul ki rétegződés. A légkörben a hőmérséklet különbség okozta éles sűrűségkülönbség okoz turbulenciát [24].

A vegyiparban mind a hőmérséklet [25] mind a koncentráció okozta [26] sűrűségkülönbség következtében létrejövő rétegződés bekövetkezhet. Sűrűségkülönbség okozta rétegződés előfordulhat, mikor egy tartályba olyan



## Irodalom

oldatot töltenek, mely sűrűsége eltér a tartályban lévő oldat átlagos sűrűségétől [27]. Számos kutató foglalkozik az olajfinomítói folyadék termékek csővezetéken történő szállítása során kialakuló rétegződéssel továbbá annak megakadályozása céljából a megfelelő csőkialakítás vizsgálatával [28].

*Grenville és munkatársai* különböző geometriájú propeller keverők hatásait vizsgálta a keverési időre (99 %-os homogenitás elérése) két rétegű folyadékrendszerben. A propeller keverők a hengeres tartály fenekével párhuzamosan kerültek elhelyezésre („side-entering agitator”), 10°-os szögben a tengelyhez képest. A vizsgált kétrétegű rendszerben az alsó folyadék réteg telített sóoldat, míg a felső réteg víz volt. A koncentráció változást vezetőképesség-méréssel követték nyomon. A keverő fordulatszámát úgy állították be, hogy a keverési Reynolds-szám<sup>2</sup> turbulens tartományban legyen. A 10°-os szögnek köszönhetően erős, órajárásával megegyező irányú tangenciális áramlástér keletkezett. Ezek ellenére azt állapították meg, hogy a híg és a tömény réteg között határréteg nehezen bomlik meg, a híg rétegben folyadék áramlást kis Froude-szám ( $Fr < Fr_c^3$ ) esetén nem tapasztaltak. Mikor a Fr-szám nagyobb volt, mint egy, a keverés már kellő energiát biztosított a határréteg megbontásához. Továbbá megállapították, hogy a szükséges keverési időtartamra nagy hatással van a propeller geometriája [29].

*Derksen* kétrétegű folyadék keverését vizsgálta, mely során 45°-ban döntött lapátú turbina keverőt használt. A zárt henger tartályban továbbá négy áramlás törő is elhelyezésre került. Célja az volt, hogy megvizsgálja a keverési Reynolds-szám és a Richardson-szám<sup>4</sup> hatását a keverésre. A vizsgálatokhoz számítógépes szimulációt alkalmazott. Az eredményei alapján megállapította, hogy a felhajtóerő jelentős hatással van a rendszer keverésére amennyiben a Ri-szám nagyobb, mint

---

<sup>2</sup> Keverési Reynolds-szám: dinamikus keverőkre vonatkozó dimenziómentes hasonlósági szám.  $Re_k = \frac{Nd^2}{\nu}$ ,  $Re_k$  a keverési Reynolds-szám [-],  $N$  a keverő fordulat száma [ $s^{-1}$ ],  $d$  a keverő átmérője [m],  $\nu$  kinematikai viszkozitás [ $m^2 s^{-1}$ ]. [29].

<sup>3</sup> Froude - szám: dimenziómentes, hasonlósági szám.  $Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$ , ahol  $Fr$  a Froude-szám [-],  $v$  az áramlás sebessége [ $m s^{-1}$ ],  $g$  a nehézségi gyorsulás [ $m s^{-2}$ ],  $L$  a jellemző hosszúság [m].  $Fr=1$ , kritikus áramlás ( $Fr_c$ ),  $Fr > 1$  szuperkritikus áramlás (gyors),  $Fr < 1$  szubkritikus, lassú áramlás [3].

<sup>4</sup> Richardson-szám: dimenziómentes szám,  $Ri = \frac{g \Delta \rho}{\rho N^2 d}$ , ahol  $Ri$  a Richardson szám [-],  $g$  a gravitációs gyorsulás [ $m s^{-2}$ ],  $\Delta \rho$  sűrűség különbség [ $kg m^{-3}$ ],  $N$  keverő fordulatszám [ $s^{-1}$ ],  $d$  keverő átmérője [m] [30].

## Irodalom

0.03125. A keletkező turbulens áramlás hajtóereje a keverő környezetében keletkező örvények struktúrája. A turbulens áramlás hatására a híg- és tömény folyadékréteg között a határréteg gyorsabban megbomlik, így rövidebb a szükséges keverési idő [30].

Jet betáplálásnak nevezzük a nyíláson kiáramló fluidum speciális áramlási képét. A jet jellegű keverés gazdaságos módja a keverésnek, kiváltképpen nagy méretű tartályokban. A keveréshez szükséges energiát a szivattyú biztosítja, egyéb eszköz pl. keverő nem szükséges a homogenizáláshoz [31]. *Shakouchi és munkatársai* kétrétegű-folyadék keverését vizsgálták jet jellegű betáplálással. Az általuk vizsgált tartály téglalap alapú volt, melyben a híg folyadék réteget a víz, míg a sűrűt NaCl oldat szimbolizálta. Minden mérés a két-rétegű folyadék rendszerből indult ki. A betáplálási fúvóka 100 mm átmérőjű volt, mely 20 mm-re nyúlt be a tartály középpontja felé. A fúvóka 90°-os szöveget zárt be a tartály alapjával. A tartályban lévő folyadék szintje állandó volt, melyet egy recirkulációs pumpa biztosított. A kutatásban a jet Reynolds-szám<sup>5</sup> ( $90 \leq Re_j \leq 4200$ ) nagyságának hatásait vizsgálták a keverés hatékonyságára. A kutatók három mintázatba osztották a jet áramlás képét a  $Re_j$ -szám függvényében. Az első áramlási kép, kis  $Re_j$ -szám ( $Re_j=95$ ) mellett lépett fel. A jet sugár elérte a két folyadék réteg közötti határfelületet, azonban a kisebb sűrűségű rétegbe nem hatolt be. A sugár a határfelület mentén horizontálisan terült szét. Abban az esetben mikor a  $Re_j$ -szám 476 volt a sugár behatolt a határrétegbe, de a víz rétegbe nem. A betáplált fluidum visszasüllyedt a határrétegre, azon horizontálisan szétterült, de nem lépte át újra a határfelületet. Nagy jet  $Re$ -szám esetén ( $Re_j=2378$ ) a jet sugár eléri a híg réteg tetejét, azaz a folyadékréteg felszínét. Ezek alapján elmondható, hogy az első esetben keverés csak az alsó folyadék rétegben figyelhető meg. Nagyobb jet  $Re$ -szám esetén a határfelület rétegre, míg a legnagyobb  $Re_j$ -szám esetén már a teljes folyadéktérfogatra kiterjed a keverő hatás. A kutatók továbbá megállapították, hogy a jet sugár magassága meghatározható a rétegek sűrűségével számolt  $Fr$ -szám segítségével [32].

---

<sup>5</sup> jet Reynolds-szám: dimenziómentes szám a jet áramlásra,  $Re_j = \frac{d_0 U_0}{\nu}$ , ahol  $Re_j$  a jet Reynolds-szám [-],  $d_0$  a fúvóka átmérője [m],  $U_0$  a fúvókából kilépő fluidum sebessége [ $m\ s^{-1}$ ],  $\nu$  kinematikai viszkozitás [ $m^2\ s^{-1}$ ] [31].

## Irodalom

*Degawa és munkatársai* az előbb bemutatott vizsgálathoz hasonlóan végeztek. A kutatók két-rétegű folyadék rendszer (NaCl és víz) keverését tanulmányozták henger alakú tartályban, jet betáplálással. Ebben az esetben a tartály fenekére és a fúvóka által bezárt szög  $60^\circ$ -os volt. A jet Reynolds-számot 475 és 4753 között változtatták. A  $Re_j$ -szám függvényében a keletkező áramlási képeket három csoportba sorolták. Az első csoport esetén ( $475 \leq Re_j \leq 713$ ) a jet sugár eléri a két réteg közötti határfelületet, de abba nem hatol be és betáplált folyadék a határfelület mentén, horizontálisan szétterül. A következő mintázat ( $951 \leq Re_j \leq 2376$ ) kapcsán a kutatók ugyanazt figyelték meg, mint Shakouchi és munkatársai. A harmadik mintázatba a 2614 és 4753  $Re_j$ -szám közé eső jet áramlásokat sorolták, melyek során azt tapasztalták, hogy a belépő áram eléri a folyadékfelszínt és a mentén elterül, majd visszasüllyed a határrétegre. A két kutatás összehasonlítása alapján azt lehet elmondani, hogy mikor a fúvóka nem merőleges a tartály fenekére, hanem  $60^\circ$ -os szöget zár be azzal, akkor nagyobb betáplálási sebességgel kapjuk meg ugyanazokat az áramlási képeket, mint a  $90^\circ$ -os fúvóka esetén. A két kutató az áramlásokat ugyanazon szisztéma szerint osztotta be. A második csoportba, mikor a jet sugár eléri a határfelületet és bele is hatol,  $90^\circ$ -os fúvóka esetén elég volt 476-os  $Re_j$ -szám, míg a  $60^\circ$ -os fúvóka esetén legalább 951 értéket kellett biztosítani. A tartály egészére kiterjedő keverés  $60^\circ$ -os fúvóka esetén 2614  $Re_j$ -szám során valósult meg, míg  $90^\circ$ -os fúvóka alkalmazásakor 2378-as  $Re_j$  is elegendő volt [27].

### 1.4 Homogenitás meghatározása

Homogén folyadéknak nevezzük azokat a folyadék rendszereket, melyekben a molekulák a tér bármely pontjában, adott időben azonos eloszlást mutatnak. Homogén rendszer nem tartalmaz egynél több fázist és nem fordul elő fázis szeparáció [33]. A homogenitás foka igénytől függően változik, leggyakrabban min. 90 - 95 %-os homogenitást írnak elő [34], de vannak olyan folyamatok pl. a gyógyszeripar, melyeknél 99 %-os homogenitásnál kisebb nem fogadható el [35]. Kétfázisú rendszer homogenitásáról is beszélhetünk, itt a homogenitás alatt a két fázis homogén eloszlását értjük a térben. A homogenitás számításához a rendszer valamely minőségi jellemzőjét kell mérni a keverés során. Ez a paraméter lehet a

## Irodalom

szilárd részecskék eloszlása a folyadék fázisban [36], nem elegyedő folyadékok eloszlása a folyadék fázisban [37], gáz eloszlás folyadék fázisban [38]. Egyfázisú rendszerek esetén sokszor a homogenitás értékét vezetőképesség [39] vagy hőmérséklet [40] adatokból számolják.

A homogenitás számításához szükséges paraméterek mérésének számos labortechnikai eszköze van. A szakirodalom intruzív és nem-intruzív csoportokba sorolja a mérési módszereket a szerint, hogy a mérési eszköz behatol a mérendő mátrixba vagy nem. Nem-intruzív mérési módszerek a kolorometria, az elektromos ellenállás tomográfia, a pozitron emissziós tomográfia, a lézer indukált fluoreszcencia, lézer-Doppler anemometria, fázis-Doppler anemometria [41, 42].

A lézer-Doppler anemometria egy nem-intruzív méréstechika, mely segítségével turbulens, időfüggő, 3dimenziós áramlási mezők vizsgálhatók, mind gáz, mind folyékony közegben. Ezt a technikát gyakran alkalmazzák két-fázisú rendszerek vizsgálatára, pl. buborékok mozgásának vizsgálatára buborék kolonnákban [43]. A fázis-Doppler anemometria részecske méret meghatározására való, melyet alkalmazhatnak buborékok vagy folyadék cseppek méretének vizsgálatára [44]. A részecske-képen alapuló sebesség meghatározás alapja, hogy a mérendő közegbe nyomjelző anyagot adagolnak és ezen kisméretű részecskék sebességéből (lézeres sebességmérés) következtetnek a közeg sebességére [45]. Koncentráció térkép meghatározásához elterjedt technika a lézer indukált fluoreszcencia. Ezen módszer esetén fluoreszcens nyomjelző anyagot használnak (pl.: fluorescein, rodamin B, rodamin 6G) [46]. A pozitron emissziós részecske tomográfiát („positron emission particle tracking”, PEPT) elsőként az orvos diagnosztikában használták mára azonban a vegyészmérnöki tudományterületen is elterjedt. A módszer alapja a pozitron annihiláció. A vizsgálat során olyan radionuklid nyomjelzőt alkalmaznak, mely béta-plusz bomláson keresztül bomlik, miközben kettő gamma sugárzást bocsájt ki. A detektorként szolgáló kamerák e sugarakat rögzítik [47]. Az elektromos ellenállás tomográfia („electrical resistance tomography”, ERT) az egyik legelterjedtebb laboratóriumi méréstechika a keverés vizsgálatára. A módszer alapja azon nyugszik, hogy a vizsgált fluidumoknak más-más a vezetőképessége és a tartály falán körkörös elhelyezett elektród párok a vezetőképességet mérik, így alkalmas a tartályban részletesen vizsgálni az áramlási

## Irodalom

képet [48]. Gazdaságos nem-intruzív mérési technika a kolorimetria, mely a színes nyomjelző anyag nyomkövetésén alapszik. Kolorimetriás módszer lehet, mikor valamilyen pH érzékeny jelzőanyagnak (pl.: nátrium-hidroxid+sósav+fenolftalein) színváltozását használjuk ki [49] a folyamat nyomon követésére.

Intruzív technikák közé tartoznak azok a mérési módszerek, melyek detektáló eszközei a vizsgált mátrixba vannak elhelyezve. Ezek lehetnek vezetőképesség mérő vagy ion szelektív elektródok valamint hőmérsékletmérők. Ezen technológia alkalmazása során nagyon körültekintőnek kell lenni, hiszen az elektródok viselkedhetnek áramlástörőként, így hamis képet adva a rendszer hidrodinamikai tulajdonságairól. A mérő eszközök a tartály adott pontjaiban vannak pozícionálva, így az csak az elektródot körülvevő közvetlen környezetről ad információt. Ezen mérési módszerekkel kapott adatokkal közvetetten tudunk csak a rendszerben kialakuló áramlásra következtetni [41]. A gyűjtött adatokból a statisztika eszközeivel (tartózkodási idő eloszlás) ideális modellekhez hasonlíthatjuk az eredményeinket.

### 1.5 Tartózkodási idő függvények

Vegyipari folyamatok esetén kiemelten fontos, hogy egy fáziselem vagy molekula mennyi időt tölt el a berendezésben. A műveleti egységeket időbeli viselkedésük alapján szakaszos és folyamatos műveleti egységek csoportjaiba sorolhatjuk. Szakaszos művelet esetén minden fáziselem vagy molekula azonos ideig tartózkodik a berendezésben, mivel a töltés és ürítés időszükséglete elhanyagolható a konkrét művelet idejéhez képest. Szakaszos műveletet leggyakrabban üst reaktorban hajtanak végre, ahol azért, hogy minden molekulának azonos környezetet biztosítsanak intenzív keverést alkalmaznak. Ebben az esetben tökéletesen kevert üstről beszélhetünk. Ebben a típusú műveleti egységben az intenzív állapotjellemzők időben változnak, azonban a helytől függetlenek. Tehát a rendszer az intenzív állapotjelzők szempontjából makroszkópiusan izotrópnek tekinthető. Folyamatos műveleti egységben az intenzív állapotjelzők, azonban általában nem függenek az időtől. A folyamatos egységek lehetnek csőszerű vagy üstszerű geometriájúak. Azonban a geometria ismerete, nem elégséges ahhoz, hogy meg tudjuk mondani, hogy egy bizonyos molekula mennyi időt tölt a készülékben.

## Irodalom

Mikor tartózkodási időről beszélünk, akkor egy olyan valószínűségi változóról beszélünk, mely azt fejezi ki, hogy az adott molekula milyen valószínűséggel jelenik meg egy adott időintervallumban a berendezés kimenetén [50]. A készülékben lévő közeg különböző részei más-más utat tesznek meg, így a közeg egyes részeire más-más időadatot kapunk. Ezek összességét nevezzük tartózkodási idő függvénynek. A tartózkodási idő-függvények kialakulását a keveredésnek tulajdonítják, mely ebben az esetben nem egy mechanizmus, hanem mindazon hatások összessége, mely következtében e függvények létrejönnek. A keveredés folyamatának vizsgálatához valamilyen jelet kell generálni a berendezés bemenetén. A jel deformációja az elegyedés során jellemző a vizsgált berendezésre [7].

Ideális esetben a molekulák tartózkodási ideje megegyezik a berendezés átlagos tartózkodási idejével ( $\bar{t}$ ), ami a berendezés fluidum által elfoglalt térfogatának ( $V$ ) és a betáplálási térfogatáram ( $B$ ) nagyságától függ [51].

$$\bar{t} = \frac{V}{B} \quad 1-23$$

A tökéletes áramlástól való eltérést okozhatja a fluidum csatorna jellegű áramlása, a fluidum visszaáramlása továbbá holtterek jelenléte. Holttereknek nevezzük azokat a fluidum térfogatókat, melyben az anyagtranszport csak vezetési transzport útján valósul meg. A kényszer konvekciótól elzárt térfogatókban az anyagtranszport időigénye nagyságrendekkel megnő. A tartályba belépő folyadékelemek különböző utat járnak be, mielőtt kilépnek a tartályból, ennek megfelelően eltérő időtartamot töltenek a tartályban, így a tartózkodási időt valószínűségi változóként kezelhetjük [52]. A belépő fluidum elemek tartályban töltött idejének eloszlását, más néven a kilépőáram koreloszlását a tartózkodási idő sűrűség függvényvel ( $E(t)$ , [ $s^{-1}$ ]) írhatjuk le (9. ábra a;). A tartózkodási-idő sűrűség függvény  $t'$  és  $t'+dt$  közötti integrálja ( $\sim E(t)dt$ ) adja meg annak a valószínűségét, hogy egy kérdéses molekula a  $t'$  és  $t'+dt$  intervallumban kilép a berendezésből (1-24) [1, 50, 51].

$$E(t)dt = p(t' < t < t' + dt) \quad 1-24$$

A molekula végtelen hosszú idő múlva biztosan kilép a berendezésből, illetve a kilépő fluidum valamennyi korú elemét összeadva magát a kilépő áramot kell kapnunk, így az  $E(t)$  görbe alatti terület egyet ad (1-25).

## Irodalom

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \quad 1-25$$

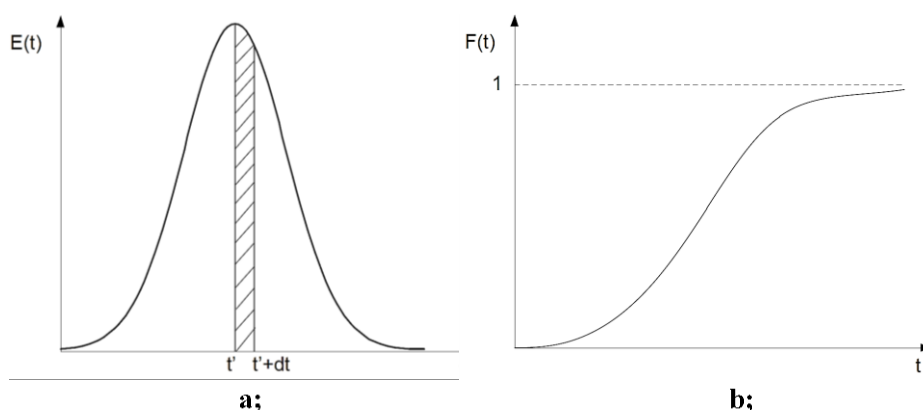
Másképp fogalmazva az  $E(t) \cdot dt$  szorzat számszerűsíti azt, hogy a kilépő áramból találomra kiválasztott részecske milyen valószínűséggel idősebb, mint  $t'$ , de fiatalabb, mint  $t'+dt$ . A tartózkodási idő sűrűség függvény dimenzió mentes alakját ( $E(\Theta)$ ) a dimenziómentes idő ( $\Theta$ ) segítségével határozhatjuk meg, ahol  $\Theta$  az eltelt idő ( $t$ ) és az átlagos tartózkodási idő hányadosa.

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad 1-26$$

Mint minden valószínűségi változónak, a tartózkodási időnek is van eloszlása ( $F(t)$ ), mely a sűrűség függvény integrálja (9. ábra b;).

$$F(t) = \int_0^t E(t)dt \quad 1-27$$

Az  $F(t)$  valamely  $t'$  időponthoz tartozó értéke, annak valószínűségét adja meg, hogy a kérdéses molekula vagy fázis elem  $t'$  időpontban már kilépett a berendezésből, így  $F(t)$  egyhez tartó monoton növekvő függvény [1, 50, 51, 53].



**9. ábra: A tartózkodási idő a; sűrűség és b; eloszlás függvénye [50]**

A készülékben tartózkodó anyag részecskéi más és más pályán mozognak, így ha a részecskék korát a belépés pillanatától mérjük, akkor a készülékben tartózkodó részecskék kora is más és más. A koreloszlás függvény ( $W(t)$ ) annak a valószínűségét adja meg, hogy a kérdéses molekula vagy fáziselem  $t'$  időpontban még a berendezésben tartózkodik.

$$W(t) = 1 - F(t) \quad 1-28$$

## Irodalom

A műveleti egységben lévő molekulák és fáziselemek koreloszlásáról a belső koreloszlás függvény  $I(t)$  ad tájékoztatást, mely megadja azon molekulák hányadát, mely kora  $t'$  és  $t'+dt$  időintervallumba esik (10. ábra).

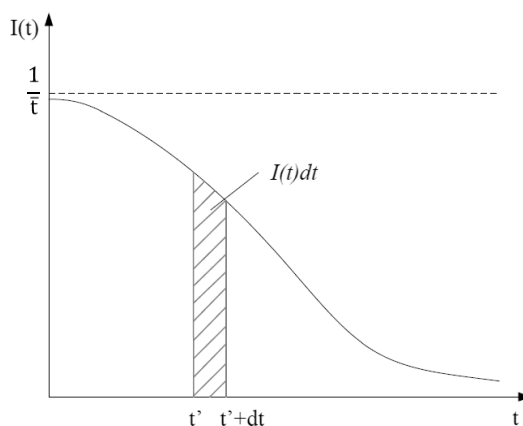
$$E(t) = -\bar{t} \frac{dI(t)}{dt} \quad 1-29$$

Abban az esetben, ha a betáplálás  $B$ , akkor nullától  $dt$  ideig  $B \cdot dt$  térfogat kerül a berendezésbe, ami kis  $dt$  esetén még teljes egészében jelen is van. A teljes térfogathoz ( $V$ ) viszonyítva ez a 1-30 egyenletet adja.

$$\frac{B \cdot dt}{V} = I(0)dt = \frac{1}{\bar{t}} dt \quad 1-30$$

A belső koreloszlás függvény tehát  $\frac{1}{\bar{t}}$ -ből indul. A függvény monoton csökken, mivel a korábban rendszerbe került  $B \cdot dt$  részekből egyre kevesebb hányad marad a rendszerben.

Az  $I \cdot dt$  szorzat méri, hogy taláalomra belenyúlva a rendszerbe, milyen valószínűséggel ragadhatunk ki a készülékből olyan térfogatelemeket, melynek kora  $t'$  és  $t'+dt$  időintervallumba esik [1, 50, 51].



10. ábra: Belső koreloszlás sűrűség függvény [50]

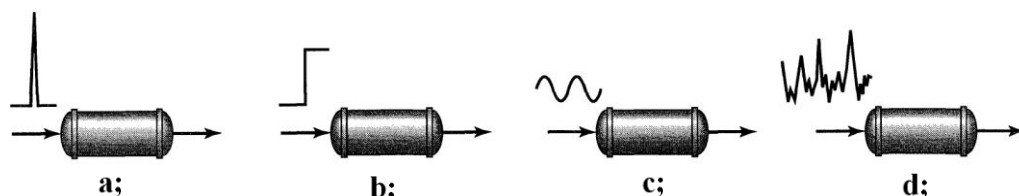
### 1.5.1 A sűrűségfüggvények meghatározása

A berendezések áramlástani modelljének meghatározásához, meg kell határoznunk azok tartózkodási-idő eloszlás sűrűség függvényét. A mérési technika lényege, hogy a belépő áramban a készülék bemenetén valamilyen jelzőanyaggal zavarást hozunk létre, majd figyeljük, hogy a zavarás hogyan jelenik meg a kilépő áramban. A választott jelzőanyagnak jól kell oldódnia a vizsgált fázisban, könnyen



## Irodalom

mérhető jelet kell adnia, nem szabad reakcióba lépnie, nem szabad adszorbeálódnia és nem változtathatja meg a kérdéses fázisnak az áramlási tulajdonságait. A jelzőanyag bevitelének több módja lehet: injektálás (Dirac- $\delta$ ), egységugrás függvény (Step-függvény, HEAVISIDE-függvény), szög-függvények, random jel függvény [54].



**11. ábra: Zavaró függvények a; Dirac- $\delta$  b; egységugrás c; szög-függvény d; random függvény [54]**

A készülékbe belépő anyagáram egy részét megjelöljük. A megjelölt résznek az átlagos tartózkodási időnél jóval kisebb idő alatt (elhanyagolhatóan kis idő) kell áthaladnia a belépő kontrollfelületen. Az ilyen bemenő jelet impulzusszerűnek mondjuk és ideális esetben, időbeli lefutását tekintve Dirac- $\delta$  függvény alakúnak kell lennie. A Dirac- $\delta$  (1-31) olyan egységnyi területű négyyszögfüggvény, melynek időtartama infinitézimálisan rövid [55].

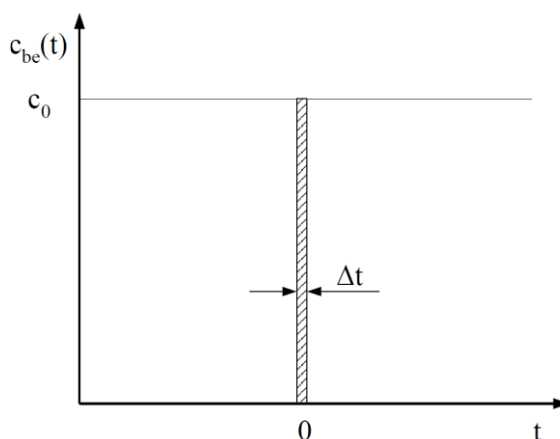
$$\delta(\xi) = \begin{cases} \infty, & \xi = t \\ 0, & \xi \neq t \end{cases} \quad 1-31$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

A valóságban a végtelen koncentráció helyett csak egy véges  $c_0$  koncentráció érhető el a beinjektálást követően.

$$\delta(\xi) = \begin{cases} c_0, & t < \xi < t + \Delta t \\ 0, & \xi < t \text{ vagy } \xi > t + \Delta t, \end{cases} \quad \text{ahol } \Delta t \text{ tart } 0 \text{ - hoz} \quad 1-32$$

## Irodalom



**12.ábra: Dirac- $\delta$  függvény [50]**

Abban az esetben, ha vizes közeg áramlik a berendezésünkön és a belépő áramban rövid idő alatt tömény NaCl oldatot injektálunk, a kilépő áram vezetőképessége alapján meghatározhatjuk annak a koncentrációját ( $c(t)$ ).

A kilépő  $B$  áram  $dt$  idő alatt  $B \cdot c(t) dt$  jelzőanyagot ürít ki, továbbá a jelzőanyag teljes  $m$  tömege (1-33 egyenlet) előbb vagy utóbb összes mennyiségben kiürül.

$$m = \int_0^{\infty} B \cdot c(t) dt \quad 1-33$$

A kapott koncentrációfüggvényt a görbe alatti területtel (1-34) normálva kapjuk a  $C(t)$  függvényt.

$$C(t) = \frac{B \cdot c(t)}{m} = \frac{B \cdot c(t)}{\int_0^{\infty} B \cdot c dt} = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c \cdot dt} \quad 1-34$$

Az egységugrás bemenő jelet úgy képezzük, hogy a jelző anyagot a nulla időpillanattól kezdődően a kísérlet végéig adagoljuk. A belépő áramban a jelzőanyag koncentrációja  $c_0$ , egy idő múlva egyre növekvő koncentrációval a jelzőanyag megjelenik a kilépő áramban. Valójában mondható, hogy a másfajta közeg, melyet betáplálunk, kiszorítja az előtte haladó, eltérő tulajdonságú közeget a vizsgált térfogatból. Az ilyen bemenő jelet ugrásszerű, időbeli lefutását tekintve lépcsős függvénynek nevezzük [50, 51, 54].

Az egységugrás függvény (1-35) az impulzusfüggvény integrálja.

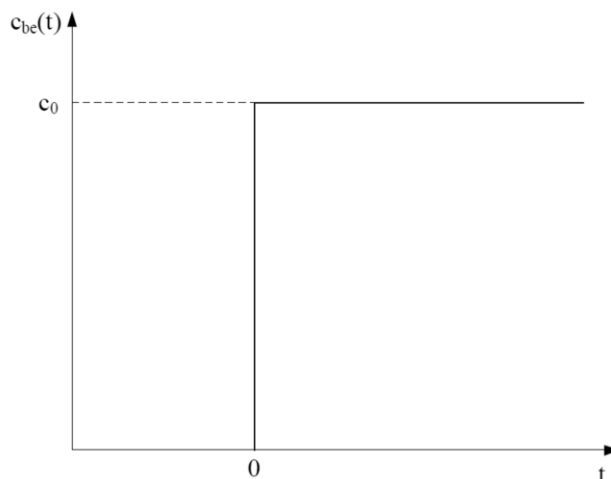
$$H(t) = \int_{-\infty}^t \delta(t) dt \quad 1-35$$

$$H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$

## Irodalom

Az egységugrás függvényt az előbb leírtak alapján gyakorlatban úgy állítjuk elő, hogy a 0 időpillanattól folyamatosan jelzőanyagot táplálunk be állandó koncentráció mellett (1-36) [55].

$$H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ c_0, & t > 0 \end{cases} \quad 1-36$$



**13. ábra: Egységugrás függvény [50]**

A kilépő áramban egyre növekszik a jelzőanyag koncentrációja és egy idő után a kilépő áram  $c(t)$  koncentrációja megegyezik a belépő áram kezdeti  $c_0$  koncentrációjával. Abban az esetben, ha a jelzőanyag koncentrációját a kilépő áramban a  $c_0$  koncentrációval, mint sajátmértékkel mérünk, akkor az  $F(t)$  függvényt kapjuk (1-37). Az  $F(t)$  görbe monoton nő és tart egyhez.

$$F(t) = \frac{c(t)}{c_0} \quad 1-37$$

A matematikai kapcsolat egyértelmű a tartózkodási sűrűség és eloszlás függvény között (1-27), az alábbi gondolkísérlettel a korábban bemutatott függvények közötti logikai kapcsolatot érthetjük meg.

Tegyük fel, hogy tolulol volt a betáplálás, mely a nulladik időpillanatban benzolra cserélünk ki. A készülékben lévő benzol a készülék  $t$ -nél fiatalabb térfogatelemeiben van jelen, mely térfogatot a belső koreloszlás függvényével meg lehet állapítani. A kilépő áramban a benzol térfogathányada  $F(t)$ , így a távozó benzol mennyisége  $B \cdot F(t)$ -vel kevesebb, mint a belépő  $B$  benzol áram.

## Irodalom

1-38

benzol  
halmozódás a  
készülékben = benzol belépő  
térfogatárama - benzol kilépő  
térfogatárama

$$\frac{d}{dt} V \int_0^t I(t) dt = B - B \cdot F(t)$$

$$\bar{t} \cdot I(t) = 1 - F(t)$$

Továbbá igaz, hogy a kilépő térfogatáram benzol tartalma a kilépő áram t-nél fiatalabb térfogat hányadában van jelen.

$$B \cdot F(t) = B \int_0^t E(t) \cdot dt \quad 1-39$$

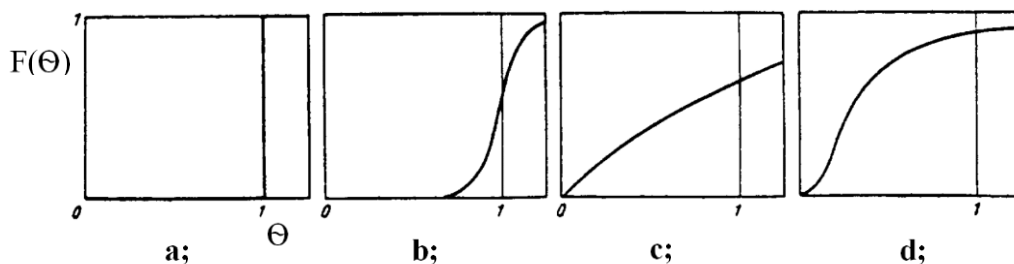
A  $C(t)dt$  függvény egyrészt méri a beinjektált jelzőanyag azon hányadát, mely  $t'-t'+dt$  között lép ki a rendszerből. Továbbá, ez a hányad azokkal a fluidum elemekkel mozog, melyek tartózkodási ideje  $t'$  és  $t'+dt$  közé esik, így  $C(t)dt$  egyúttal méri a kilépő áram megfelelő élettartamú hányadát is (1-40) [1, 56].

$$C(t) = E(t) \quad 1-40$$

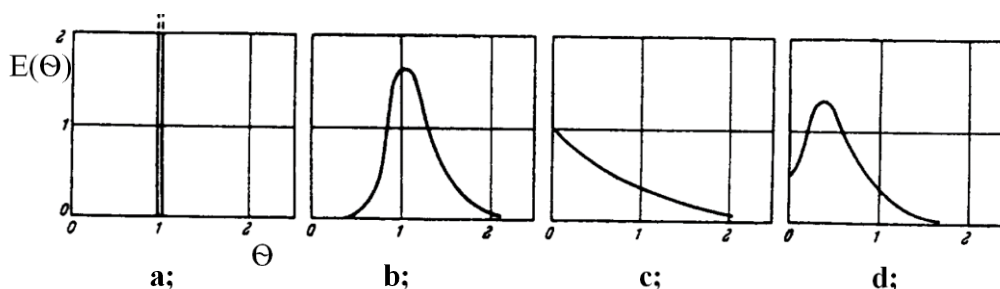
### 1.5.2 Válaszfüggvények kiértékelése

A válaszfüggvények egyik tipikus kiértékelési módja az eloszlás (14. ábra) és a sűrűség függvények (15. ábra) ideális modellekhez való hasonlítása ez az úgynevezett „compartment models”. Az általunk vizsgált reaktor válaszfüggvényét ideális berendezések modelljeihez hasonlítjuk (cső reaktor, üst reaktor, kaszkád-reaktorsor, töltött ágyas reaktor, stb.) és hasonlóság-különbség alapján állapíthatunk meg hidrodinamikai jellemzőket a berendezésünkről.

## Irodalom

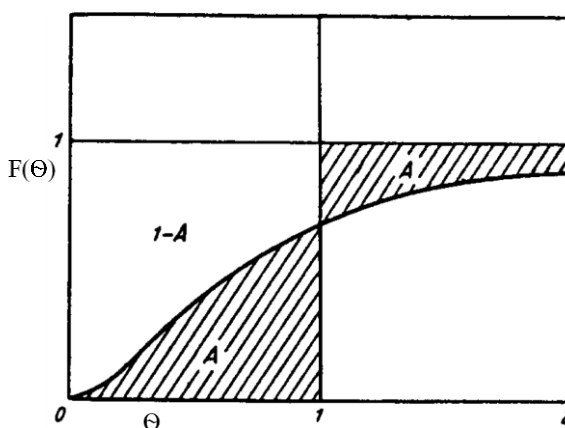


**14. ábra: Egységugrás függvényre adott válaszfüggvények a; dugó jellegű áramlás, b; dugó jellegű áramlás longitudinális keveredéssel, c; tökéletes keveredés, d; holt térfogatot tartalmazó rendszer [51]**



**15. ábra: Dirac- $\delta$  zavaró függvényre adott válasz függvények a; dugó jellegű áramlás, b; dugó jellegű áramlás longitudinális keveredéssel, c; tökéletes keveredés, d; holt térfogatot tartalmazó rendszer [51]**

A „compartment modellekhez” kapcsolódik az úgynevezett hold-back érték ( $H$ , [-]). A hold-back érték adja meg, hogy a kísérleti berendezésünk válaszfüggvénye mennyire tér el az ideális cső eloszlásfüggvényétől. Ideális cső áramlás esetén (14. ábra a;) a rendszer hold-back értéke nulla. A  $H$  érték megegyezik az eloszlás függvény görbe alatti területével  $0 < \Theta < 1$  között (16. ábra „A” terület) [51].



**16. ábra: Hold-back érték grafikus értelmezése [51]**

## Irodalom

A hold-back értékét numerikusan az 1-41 egyenlettel kapjuk meg.

$$H = \frac{1}{\bar{t}} \int_0^{\bar{t}} F(\Theta) d\Theta \quad 1-41$$

A hold-back értéke 0 és 1 között változik,  $H=0$  ideális cső reaktor esetén és  $H=1$  teljes holt térfogat során. Tökéletes üst reaktor (15. ábra c;) hold-back értéke egyenlő  $\exp(-1) \sim 0.37$  századdal. A hold-back érték vizuálisan is meghatározható, mégpedig úgy, hogy a szintelen belépő áramot adott időpillanatban pirosra cseréljük. A hold-back érték megegyezik azzal a pangó, szintelen folyadék térfogattal, mely az edényben marad azután, hogy az edény térfogatának megfelelő mennyiségű piros folyadékot juttatunk a rendszerbe. Az átlagos tartózkodási időnek megfelelő térfogattal bejutott piros folyadéknak ki kell cserélődnie a tartályban lévő szintelen folyadékkal abban az esetben, ha a rendszerben nincsenek holtterefogatok [51].

A válaszfüggvények további kiértékelési technikája a momentumok módszerével történik, melyet akkor alkalmazunk, mikor nem találunk megfelelő modellt, mely a kísérleti adatainkra illeszhető lenne. A momentumok módszere a valószínűségi változók jellemzésére alkalmas technika [57].

A tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvényének a  $t=0$ -ra vonatkoztatott  $n$ -dik momentumát az 1-42 egyenlet írja le.

$$M_n = \int_0^{\infty} t^n E(t) dt \quad 1-42$$

A jelzőanyag koncentrációval kifejezett tartózkodási idő sűrűség függvényét az 1-43-es egyenlettel kaphatjuk meg.

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad 1-43$$

A valószínűségi változó nulladik momentuma egyenlő eggyel (1-44), mely a tartózkodási idő sűrűség függvény definícióját (1-25) is adja.

$$M_0 = \int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad 1-44$$

A sűrűség függvény első momentum megadja a valószínűségi változó várható értékét, így a tartózkodási idő várható értékét (1-45) [51, 57].

## Irodalom

$$M_1 = \tau = \int_0^{\infty} tE(t)dt = \frac{\int_0^{\infty} tc(t)dt}{\int_0^{\infty} c(t)dt} \quad 1-45$$

Mivel a tartózkodási idő a molekula által bejárt út hosszával arányos, mely a fluidum által kitöltött térfogattól és a betáplálási áram nagyságától függ, így az nem ad információt az áramlási viszonyokról. Ennél fogva a tartózkodási idő várható értéke mellett meg kell vizsgálni annak szórásnégyzetét ( $\sigma^2$ ), ami a válaszfüggvény második centrális momentuma ( $\mu_2$ ) (1-46).

$$\mu_2 = M_2 - M_1^2 = \int_0^{\infty} (t - \tau)^2 E(t)dt \quad 1-46$$

A sűrűség függvényt koncentrációkkal kifejezve (1-43) megkapjuk a szórás négyzet számítási képletét folytonos valószínűségi változó esetén (1-47).

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \tau)^2 c(t)dt}{\int_0^{\infty} c(t)dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 c(t)dt}{\int_0^{\infty} c(t)dt} - \tau^2 \quad 1-47$$

Mivel a gyakorlatban a mérés során adott időközönként regisztráljuk a mért mennyiséget, így egy diszkrét adathalmazt kapunk. Minél rövidebb a mintavételezési idő annál inkább közelítjük a folytonos függvényt. Az átlagos tartózkodási idő (1-48 egyenlet) és a szórásnégyzet (1-49 egyenlet) képletében, így az integrálást szummázás váltja fel [51, 57, 58].

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^{NDP} t_i c_i}{\sum_{i=1}^{NDP} c_i} \quad 1-48$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{NDP} t_i^2 c_i}{\sum_{i=1}^{NDP} c_i} - \tau^2 \quad 1-49$$

## 1.6 Kevertség

A keverés hatékonyságát a „szegregáció” mennyiségével is leírhatjuk. A folyadékok keverése kapcsán két alap esetet kell figyelembe vennünk:

- A rendszerbe belépő fluidum önálló darabokra esik szét, majd ezek a diszkrét fragmentumok oszlanak el. Ebben az esetben a rendszert teljesen szegregáltnak tekintjük.

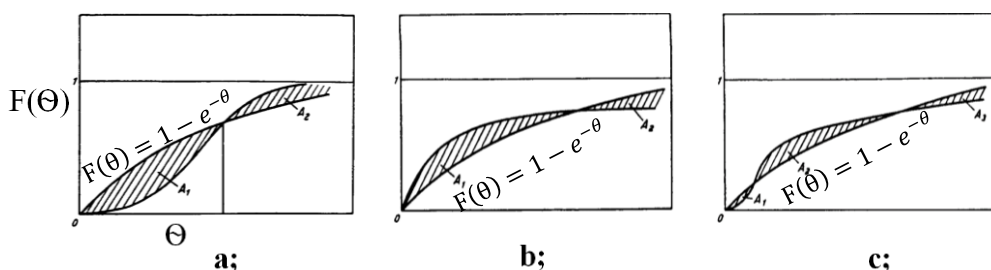
## Irodalom

- Mikor a belépő fluidum molekuláris szinten oszlik el kevesebb idő alatt, mint a rendszer átlagos tartózkodási ideje, akkor teljesen homogén rendszerről beszélünk [59].

A szegregáció értéke (S), a hold-backhez hasonlóan, meghatározható az eloszlás függvényből. A szegregáció értéke valójában a tökéletes üstreaktor eloszlás függvényéhez (1-50, 17. ábra) képesti eltérés.

$$F(\theta) = 1 - e^{-\theta} \quad 1-50$$

Amennyiben ábrázoljuk a kísérleti berendezésünk eloszlás függvényét és a tökéletes üst eloszlás függvényét egy diagramon, akkor grafikusan is megállapíthatjuk a szegregáció értékét. Amennyiben a két görbe egybe esik tökéletesen kevert rendszerünk van és a szegregáció zérus, azonban valós rendszerek esetén ez ritkán fordul elő [51].



**17. ábra: Szegregáció grafikus értelmezése a; reális rendszer, b; holt térfogatot tartalmazó rendszer c; cső jellegű áramlás longitudinális keverés esetén [51]**

A tökéletes kevert rendszertől való eltérést a satírozott területek jelölik (17. ábra). Reális rendszer vizsgálata során (17. ábra a); a két satírozott terület  $A_1$  és  $A_2$  megegyezik egymással, mivel a reális rendszer eloszlásfüggvénye is definícióból adódóan egyhez tart végtelenben. A szegregáció megegyezik a tökéletesen kevert üst és a vizsgált rendszerünk eloszlás függvény görbéi által közre zárt területtel, 0 és a két görbe metszéspontja között ( $A_1$ ). Holt térfogatot tartalmazó rendszer esetén (17. ábra b); a vizsgált berendezésben a keverés előrehaladottabb, mint tökéletesen kevert üst során. Előfordulhat olyan eset is, hogy a kísérleti görbe többször metszi az ideális üst reaktorét (17. ábra c); ebben az esetben a középső satírozott terület megegyezik a másik kettő területének összegével ( $A_2=A_1+A_3$ ). A szegregáció értéke (S) grafikus elemzéskor -1 és  $\exp(1) \sim 2.72$  között változik. S egyenlő -1-el



## Irodalom

mikor a vizsgált térfogat teljes egészében holt térfogat és 2.72, mikor cső jellegű áramlás figyelhető meg a rendszerben. Ebben a megközelítésben a tökéletes kevertség nem az adott fokú homogenitást jelenti, hanem a rendszerben lévő és az abból kilépő fluidum korának kapcsolatát. Mikor a két koreloszlás megegyezik akkor tökéletesen kevert rendszerről beszélünk [51].

*Danckwerts* tovább foglalkozott a szegregáció fogalmával és leírta más szempontból is a fogalmat, meghatározta az „A és B” anyagra vonatkozó szegregációs fokot (1-51 egyenlet). Az „A” anyag átlagos térfogat eloszlása  $\bar{\alpha}$  és „B” anyagé  $(1-\bar{\alpha})$ . Ezek a mennyiségek egy adott pontban és időben  $o$  és  $(1-o)$ . Az összetétel szórás négyzete  $\overline{(o - o)^2}$ , így a szegregáció foka (1-51) már meghatározható [59].

$$S = \frac{\overline{(o - o)^2}}{\bar{o}(1 - \bar{o})} \quad 1-51$$

1962-ben *L. M. Schwartz* *Danckwerts*-hez hasonlóan, de nem teljesen azonos módon definiálta a folyadékok kevertségi fokát. Folyadék-folyadék rendszer esetén végzett kísérlete során a jelzőanyag koncentrációt fényabszorpcióval detektálta. Kísérlete során vett két, egymással jól elegyedő folyadékot; a kiválasztott folyadékokhoz ezt követően olyan jelző-anyagot keresett, amely mindkettőben jól oldódik. A folyadékok összekeverése előtt az egyik fázisban a jelző-anyag koncentráció  $c_1$ , míg a másikban  $c_2$  volt. A két folyadékot összekeverve 1-52 egyenlet szerint definiálta az  $MD_n$  kevertségi fokot a rendszerre.

$$MD_n = \frac{\overline{\gamma^n} - (\bar{\gamma})^n}{\bar{\gamma} - (\bar{\gamma})^n} \quad 1-52$$

Az egyenletben szereplő  $\gamma$  az 1-53 egyenlet szerint fejezhető ki, ahol  $c$  a koncentráció adott pontban és időben.

$$\gamma = \frac{c - c_1}{c_2 - c_1} \quad 1-53$$

Az 1-52 egyenletben szereplő felülvonással jelölt értékek a teljes rendszerre vonatkozó átlagot jelentenek, míg az  $n$  kitevő egy pozitív, 1-től különböző számot jelöl. A folyadékok összekeverése előtt a két fázisban a koncentráció értéke  $c_1$  és  $c_2$  lehet, ezáltal  $\gamma$  0 és 1 között változhat. Mivel ez esetben az 1-52 egyenletben szereplő  $\gamma^n$  és  $\bar{\gamma}$  értékek megegyeznek,  $MD_n$  értéke 1 lesz. A keveredést követően a teljes rendszerben kialakul egy állandó koncentráció érték, melynek értéke legyen

## Irodalom

$\gamma$ . Konstans  $\gamma$  esetén az 1-52 egyenlet számlálója 0, így  $MD_n = 0$  lesz. Bár ilyen értelemben a kevertégi fok nagyon hasonlít *Danckwerts* definíciójához, az eredmény csak abban az esetben lesz azonos, ha  $n=2$ , illetve ha a koncentrációkat térfogat-törtként definiáljuk, miközben  $c_1, c_2$  értéke 0 és 1 között lehet [60].

Általánosságban a fentiek a molekulák korával írhatóak le. Legyen  $\alpha$  a molekula kora, ami eltelt azóta, hogy az belépett a rendszerbe.  $\bar{\alpha}$  a molekulák átlagos kora a berendezésben.  $\alpha_p$  a molekula átlagos kora egy adott pontban. Ennek a „pontnak” a mérete relatív, egyrészt lényegesen kisebb, mint a teljes vizsgált rendszer mérete, másrészt viszont kellően nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy megfelelő számú molekulát tartalmazzon. A belső koreloszlás függvény meghatározható a tartózkodási idő eloszlás függvényének segítségével is (1-29 és 1-30), azonban ekkor az átlagos tartózkodási idő segítségével módosított időintervallumon dolgozunk. A molekulák korának varianciája a tartály egészében az 1-54 egyenlettel írható le.

$$\text{var } \alpha = \overline{(\alpha - \bar{\alpha})^2} \quad 1-54$$

Adott pontokban lévő molekulák korának és a rendszerre vonatkozó átlagos kor varianciája a 1-55 egyenlettel határozható meg.

$$\text{var } \alpha_p = \overline{(\alpha_p - \bar{\alpha})^2} \quad 1-55$$

Tökéletesen kevert rendszerben a kevertség molekuláris szinten is egységes. Azaz a molekulák átlagos kora a tartályban és az adott pontokban megegyezik ( $\alpha_p = \bar{\alpha}$ ), így azok varianciája zérus ( $\text{var } \alpha_p = 0$ ). Teljesen szegregált rendszerben a molekulák varianciája a kilépési pontban valamint az adott pontban megegyezik ( $\text{var } \alpha_p = \text{var } \alpha$ ). A szegregáció értéke a két variancia hányadosa (1-56), értéke 0 és 1 között változhat. Teljesen kevert rendszer esetén  $S=0$ , míg  $S=1$ , ha a vizsgált berendezésben az áramlás szegregált [56, 61].

$$S = \frac{\text{var } \alpha_p}{\text{var } \alpha} = \frac{\overline{(\alpha_p - \bar{\alpha})^2}}{\overline{(\alpha - \bar{\alpha})^2}} \quad 1-56$$

### 1.7 Numerikus áramlástani modellek

Valós rendszerek esetén nem feltétlenül megfelelő a tartózkodási idő eloszlás használata, mert nem kapunk információt a keveredésről a berendezés belső pontjaiban. Ha nem ismerjük a berendezés belső áramlástani viszonyait, úgy az esetleges holttereket, áramlási csatornákat sem tudjuk beazonosítani, pusztán a jelenlétükről tudunk. A holtteres zónák azonban nem feltétlenül a kis áramlási sebesség miatt alakulnak ki, erre jó példa a belső cirkuláció kialakulása.

A CFD (Computational Fluid Dynamics) avagy numerikus áramlástani módszerek segítségével olyan áramlástani jelenségek (pl.: holtterek, belső cirkuláció) vizsgálata, illetve modellek megoldása vált lehetségessé, amelyeket korábban csak komoly egyszerűsítések útján lehetett kezelni. A CFD szimulátorokban a vizsgálandó geometria leképezése történik különböző módszerekkel. A geometria definiálása után azt felosztjuk diszkrét tartományokra (továbbá: „domainek”). A domainek kialakítása során a szimulátorok az objektumot egy vizsgálati hálóval fedik le. A valós probléma során a folyamat vizsgált változói ( $P$ ,  $\rho$ ,  $v$ ,  $T$ , stb.) folytonos eloszlásúak, azaz a vizsgálati tér minden pontjában értelmezve vannak. A hálózás után a vizsgálni kívánt tulajdonságok csak a háló csomópontjaiban vannak értelmezve [62]. A háló köztes pontjaiban a szimulátor, a folyamat változókat, a csomópontokban számított értékek interpolációjával határozza meg. A csomópontokban a folyamat változóit leíró parciális differenciálegyenleteket különböző módszerekkel diszkretizálni lehet. Az így megadható algebrai egyenletek a rendszer egészére egy algebrai egyenletrendszert alkotnak. Az egyenletrendszer megoldása numerikus módszerekkel történhet, mely finom háló vagy nagyméretű rendszer esetén rendkívül számításigényes feladat.

A CFD módszerek megoldásának pontossága függ az alkalmazott háló struktúrájától és finomságától továbbá a differenciálegyenletek diszkretizálásához használt módszerektől. Az alapvetően használt eljárások a diszkretizáláshoz a véges differenciák (FDM), a véges elemek (FEM) és a véges térfogatok (FVM) módszere. Az FDM (finite difference method) módszer során a vizsgálati pontokban az egyenletben szereplő deriváltakat különbségi hányadosok (véges differenciák) segítségével közelítjük. Az egyenlet az átalakítás után algebrai egyenlet formájában kezelhető. A módszer egyszerűsége előny, azonban a legtöbb forgalomban lévő

## Irodalom

CFD szimulátorban nem alkalmazzák, mivel bonyolult geometriák esetében használata nehézkessé válik. A FEM (finite element method) során a geometriát, melyben az áramlást vizsgálni kívánjuk, kisebb részekre bontjuk, ezeket a részeket hívjuk véges elemeknek [63]. A véges elemek peremeit csomópontoknak nevezzük. A felbontás során a véges elemekben kialakuló tulajdonságokat (áramlási kép, áramlási sebesség, hőmérséklet, koncentráció, stb.) próbafüggvényekkel közelítjük. Az így kapott egyes elemeket leíró egyenletek összessége egy egyenletrendszer képez. A rendszert leíró, analitikusan nehezen megoldható parciális differenciál egyenletrendszer így olyan formára lehet hozni, melyet számítógép segítségével, numerikus, iterációs eljárással könnyebben meg lehet oldani [64]. Az FVM módszere hasonlít a véges elemek módszeréhez. Azonban ennél a módszernél az egyes elemek csomópontjai helyett az illesztett háló által definiált kontrolltérfogatok és kontrollfelületek vizsgálata történik [65]. A módszer a transzportfolyamatokat leíró parciális differenciálegyenletek divergenciát tartalmazó, térfogati integrál részeit a Gauss-tétel segítségével felületi integrállá alakítja, a kapott felületi integrálok értékeit a definiált térfogatok felületein kiszámítja, és ezek segítségével meghatározza a vizsgált tulajdonság fluxusát a térfogatok mentén [66]. A térfogatokba belépő és az azt elhagyó fluxus értéke meg kell, hogy egyezzen a térfogatban lévő extenzív mennyiség változási sebességével, így felírható a vizsgált tulajdonság változása a háló mentén.

A különböző módszerek révén kapott egyenletekből álló egyenletrendszer megoldására ezután számos módszer áll rendelkezésünkre. Alternatív megoldási módszerek közé tartoznak például az iteratív eljárások (Gauss-Seidel, Jacobi-iteráció, stb.) [65].

A CFD szimulátorok alkalmazásával lehetőség van a folyadékkelemek koreloszlásának részletes meghatározására. Több fázisú rendszer esetén meg lehet határozni az összes fázis elem átlagos korát térben és időben is [67]. *Liu, Danckwerts* és *Zwietering* munkásságát alapul véve definiálta azon egyenleteket, melyekkel CFD programban egy stacioner áramlású rendszer esetén a keveredés hatékonysága számítható [68].

A szakirodalom alapján a turbulens modellek közül a  $k - \epsilon$  modell segítségével jól lehet vizsgálni a recirkulációs problémákat [69]. A „realizable”  $k - \epsilon$  modell

## Irodalom

(1-57) a leggyakrabban alkalmazott turbulens modellek közé tartozik, mely a Reynolds-feszültséggel ( $\overline{\rho u'_x u'_y}$ ) kiegészített Navier-Stokes egyenletre épül [70]. A Reynolds-feszültségben szereplő turbulens sebességek reprezentálják a turbulenciát. A  $k - \varepsilon$  modell célja a turbulencia a figyelembevétele a kinetikus energia számítása során.

$$\rho \frac{D\bar{u}_1}{Dt} = F_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_x} + \frac{\partial}{\partial x_y} \omega_{xy} \quad 1-57$$

$$\omega_{xy} = \mu \frac{\partial u_x}{\partial x_y} - \overline{\rho u'_x u'_y}$$

A turbulenciából fakadó turbulens viszkozitás elméletének köszönhetően a folyadékban ébredő teljes nyírási feszültség (1-58) leírható a kinetikus energia ( $k$ ) és turbulens viszkozitás ( $\nu_T$ ) segítségével.

$$\omega_{xy} = \mu \frac{\partial u_x}{\partial x_y} + \rho \left( \nu_T \left( \frac{\partial u_x}{\partial x_y} + \frac{\partial u_y}{\partial x_x} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{xy} \right) \quad 1-58$$

A kinetikus energia (1-59) és annak disszipációja (1-60) is számítható.

$$\frac{\partial}{\partial t} (k\rho) + \frac{\partial}{\partial x_x} (\rho k u_y) = \frac{\partial}{\partial x_y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_y} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad 1-59$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon\rho) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \varepsilon u_y) = \frac{\partial}{\partial x_y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\varepsilon \nu}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k \quad 1-60$$

A modell konstansok meghatározása *Launder és Spalding* nevéhez fűződik, melyek  $C_{1\varepsilon}=1.44$ ,  $C_2=1.9$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.2$   $\sigma_k=1.0$  [71]

## 2 Anyag és módszer

A munkám során sűrűség különbség következtében rétegződésre hajlamos oldat homogenizálását vizsgáltam. A keverést külső cirkulációval biztosítottam. A vizsgált rendszerre továbbá jellemző, hogy a keringetett folyadéknak nagy az átlagos tartózkodási ideje (~ 3 h). A kísérleteket  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  és  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű nátrium-tetraborát (bórax) (technikai tisztaság, Etimaden, CAS #: 1303-96-4) oldatokkal végeztem. A laboratóriumi méréseket minden esetben szobahőmérsékleten, izoterm körülmények között hajtottam végre.

Céлом volt megvizsgálni a kilépő és belépő csonk pozíciójának, a tartály geometriájának (1, 3, 5 henger elemszámú) és a méretnövelés (kis-, nagy laboratóriumi, ipari méretű) hatásait a kevertségre.

### 2.1 Analitika

A kísérleti berendezés kialakításának egyik első és legfőbb lépése a megfelelő detektálási módszer kiválasztása volt. A megfelelő érzékenység mellett fontos volt, hogy megfelelő gyakorisággal mintavételezzen a berendezés. A döntésem on-line vezetőképesség-mérőre esett. A vezetőképesség-mérés jól reprodukálható, stabil eredményeket biztosít. A kísérleteim során nem okozott gondot az, hogy a vezetőképesség-mérő elektródok áramlástörőként viselkednek, mivel a tartályban kialakuló áramlási sebesség nagyon alacsony, átlagosan kisebb min  $0.01 \text{ m s}^{-1}$  volt. A kis laboratóriumi vizsgálatok során egy két-csatornás, míg a nagy laboratóriumi berendezésben egy nyolc-csatornás vezetőképesség-mérő állt rendelkezésemre.

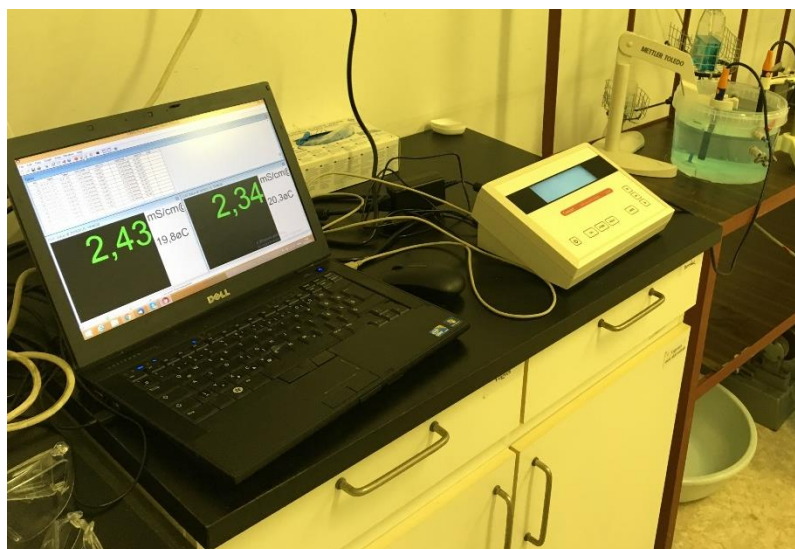
#### 2.1.1 Kis laboratóriumban alkalmazott detektálási rendszer

A mérésekhez  $0,07 \text{ cm}^{-1}$  cellaállandójú SENTEK grafit elektródokat használtam. Az elektródokat egy két-csatornás, Consort C3010-es vezetőképesség-mérővel (automatikus hőmérséklet kompenzáció) kötöttem össze. A vezetőképesség-mérő készüléket egy számítógéppel hoztam összeköttetésbe (18. ábra), melyen a mérési adatokat DIS programcsomag segítségével rögzítetem, a mérési adatok kiértékelése Microsoft Excel 2013 programcsomaggal történt. A mintavételezési idő 30 másodperc. Az elektródok közül az egyik (CH2) mindig a kilépő csonk mellett

## Anyag és módszer

került elhelyezésre, míg a másik elektród (CH1) helyét a kísérlet céljától függően változtattam (2.5, 2.6 fejezetek).

A bórax oldatokat a kísérletek előtt, frissen készítettem. Az oldatok készítésekor a pontos koncentrációk (ezáltal sűrűségek) beállítása tömegméréssel történt. A megfelelő sűrűségű oldatból készített kalibráló oldat sorozattal felvettem a kalibráló görbéket szobahőmérsékleten, mindkét elektród esetén (1. Melléklet).

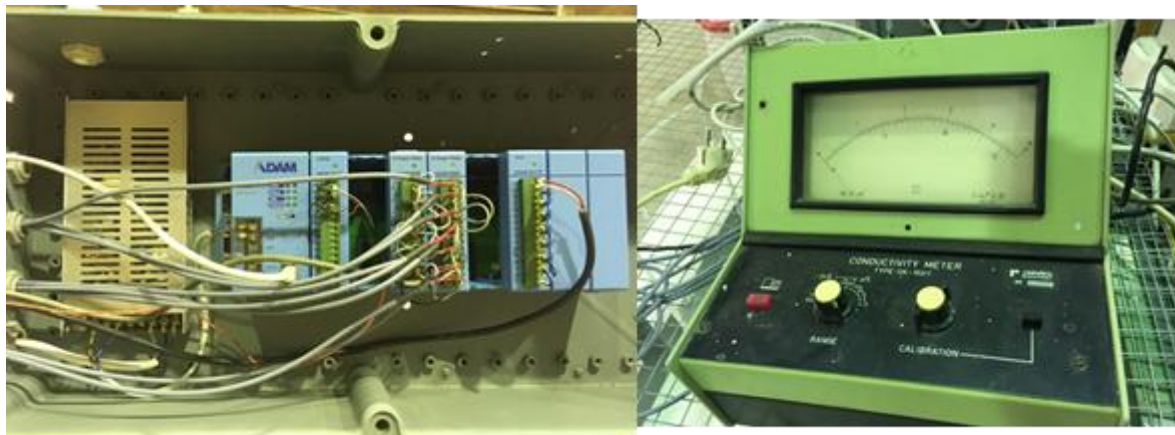


**18. ábra: Kis laboratóriumi mérőrendszer**

### 2.1.2 Nagy laboratóriumban alkalmazott detektálási rendszer

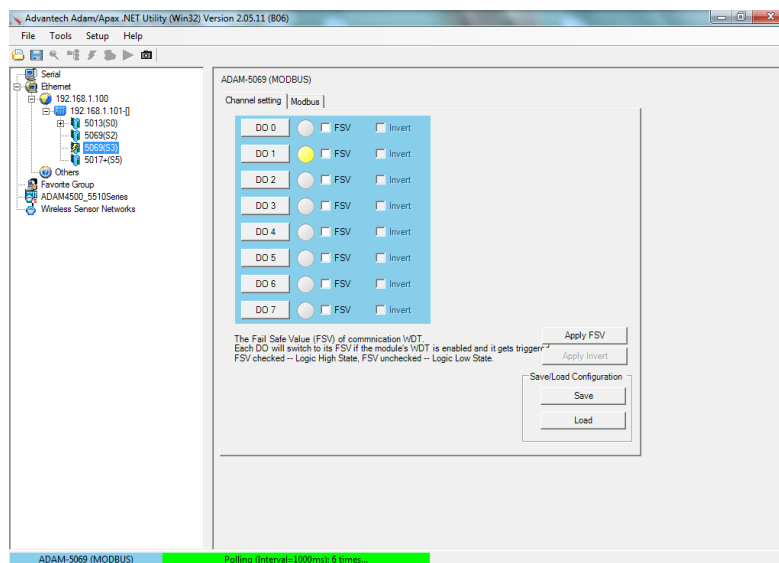
A kísérletek során az aktuális koncentráció viszonyokat ebben az esetben is vezetőképesség méréssel követtem nyomon, azonban 8 vezetőképesség-mérő elektródot helyeztem el a tartály adott pontjaiban. Az elektródok pozicionálásánál törekedem arra, hogy minél több információt nyerjek a kialakuló keverési, keveredési viszonyokról. Az elektródok 3 platina-gyűrűs, OK-9020 típusú, Radelkis márkájú konduktometriás harang elektródok voltak. Az adatgyűjtést és a detektálás irányítását az ADVANTECH gyártmányú ADAMView szoftverrel végeztem a gyártó különböző moduljaiból összeállított irányító egység (19. a; ábra) segítségével. Az elektródokat két ADAM -5069 típusú relé modulba kötöttem be. Az elektródok a vezetőképesség-mérővel (OK-102/1, 19. b; ábra) vannak összeköttetésben. A vezetőképesség-mérő készüléket az ADAM-5017P modul irányítja.

## Anyag és módszer



19. ábra: a; Irányítóegység b; Vezetőképesség-mérő készülék

A vezetőképesség-mérő készülék feszültséget ad és méri a relé által kiválasztott aktív elektród jelét. A mérő, irányító modul hálókábel segítségével küldi az adatokat a PC felé. A vezetőképesség-mérő és az irányítóegység áram alá helyezése után a kommunikációs kapcsolatot a mérőrendszer és a PC között az Advantech.Adam/Apax.NET Utility programmal vettem fel (20. ábra).



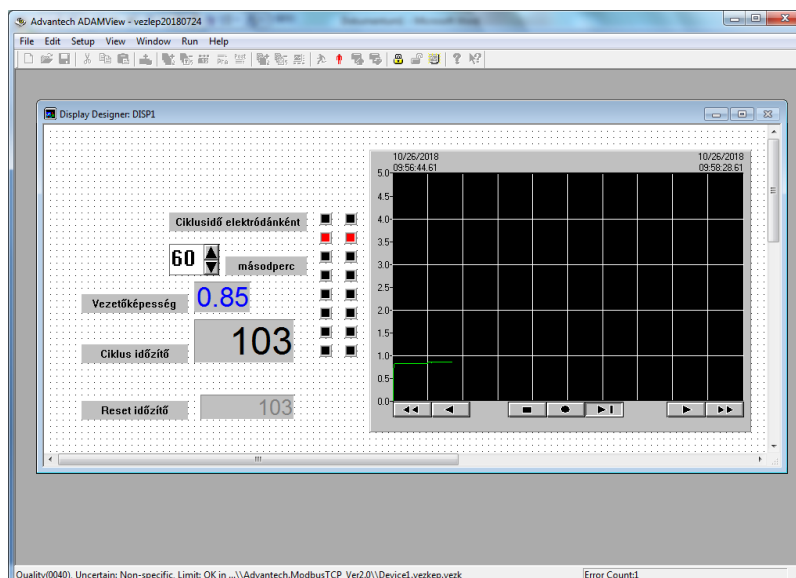
20. ábra: Advantech.Adam/Apax.NET Utility program felülete

A program segítségével nyomon tudtam követni a mérőkör helyes kapcsolását, nem megfelelő üzem esetén be tudtam avatkozni. A mérőkört az ADAMView programban alakítottam ki, úgy, hogy elektródok egymás után 60 másodpercen keresztül mérnek. Azaz például az 1-es jelű elektród 0-60 másodperc között mér, majd a relé átkapcsol a 2-es jelű elektródra, amely 60-120 másodperc között méri



## Anyag és módszer

az adatokat, és így tovább. Mivel nyolc elektród van, egy ciklus 480 másodpercig tart, majd minden kezdődik előlről. A program segítségével nyomon tudtam követni az aktuális eredményeket (21. ábra). A program .txt fájlban rögzíti a kapott adatokat.



21. ábra: ADAMView program felülete

A bórax oldatokat a kísérletek előtt, frissen készítettem. Az oldatkészítése ebben az esetben is tömegméréssel történt, majd minden elkészített oldat sűrűségét ellenőriztem. A megfelelő sűrűségű oldatból készített kalibráló oldat sorozattal felvettem a kalibráló görbéket szobahőmérsékleten, mind a nyolc elektród esetén (2. Melléklet)

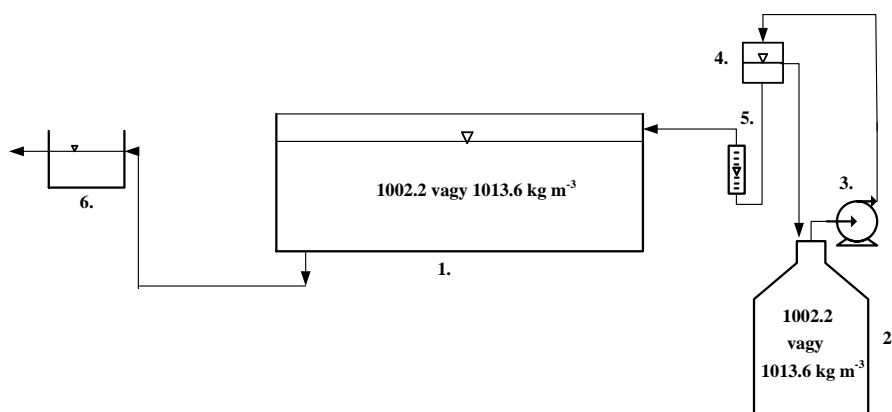
### 2.2 Tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok

A tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok végrehajtásához biztosítanunk kell, hogy a nyomjelző anyag homogén oldatba lépjen be, továbbá az oldat betáplálása és elvétele állandó, ugyanakkora térfogatárammal történjen. A kísérletek során egységugrás függvény (1-35) szerint zavartam a rendszert. Annak ellenére, hogy a dirac-delta függvény (1-31) a leggyakrabban alkalmazott zavaró jel, nehéz előállítani ebben az esetben, ugyanis a nagyobb térfogatban a jelzőanyag eloszlik, ezért a kis koncentrációkban megjelenő jelzőanyag a mérési pontokban nehezen detektálható. A tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok méréselrendezése geometriától, mérettől függetlenül ugyanaz volt. Ebben a fejezetben az általánosan

## Anyag és módszer

érvényes jellemzőket mutatom be, az ettől való esetleges eltérésre a figyelmet az egyes konstrukciók fejezeteinél hívom fel (2-5., 2-6., 2-7. fejezetek).

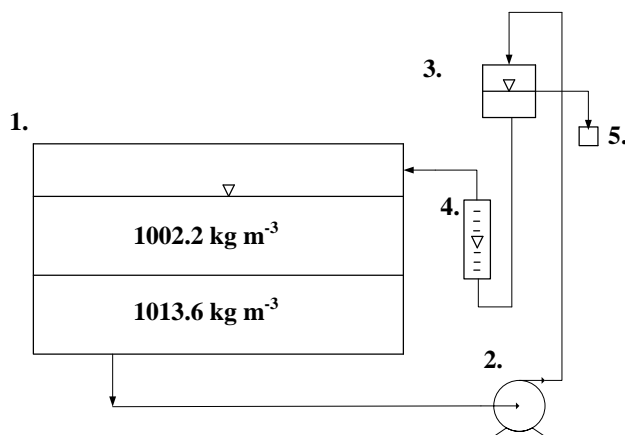
A tartózkodási idő eloszlás vizsgálatoknál (22. ábra) a kísérleti tartályba (1) a megfelelő térfogatú  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$ -es oldatot töltöttem és a betáplált oldat  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű (pozitív egységugrás függvény) volt. Az oldattároló tartályból (2) az  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldatot a perisztaltikus pumpa (3) a puffer tartályba (4) szállította. A puffer tartály feladata volt a perisztaltikus pumpa pulzálását kiküszöbölni és az egyenletes betáplálásról gondoskodni a kísérleti tartályba. A puffer tartályba egy túlfolyó volt beépítve ezzel biztosítottam az állandó hidrosztatikai nyomást. A túlfolyón távozó oldat a 2-es jelű oldattartályba folyt vissza. A kísérleti tartályba a folyadékbetáplálás gravitációsan történt, térfogatáramát szorítókkal szabályoztam és rotaméterrel (5) ellenőriztem. A kísérleti tartályból (1) kilépő oldat a 6-os jelű szintszabályozó tartályba került. Ez a tartály a folyadékszinttel megegyező magasságban volt elhelyezve, így biztosítva az állandó folyadékszintet a kísérleti tartályban továbbá a betáplálással megegyező térfogatáramú elvételt. A CH2-es jelű elektródot az elvételi csonk mellett pozicionáltam, mely a kilépő áramot mintavételezte. Ebben a pontban rögzítettem a berendezés átmeneti függvényét, melyből később tartózkodási idő eloszlás függvényt számoltam. A kísérletet elvégeztem fordítva is, azaz  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldatot töltöttem a tartályba és  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$ -es oldatot tápláltam be (negatív egységugrás függvény).



**22. ábra: Tartózkodási idő eloszlás vizsgálat általános mérés elrendezése (1. kísérleti tartály, 2. oldat tároló tartály, 3. perisztaltikus pumpa, 4. puffer tartály, 5. rotaméter, 6. szintszabályozó tartály)**

### 2.3 Recirkulációs vizsgálatok

A homogenizálás vizsgálatának céljából egy szélsőséges esetből indultam ki, mégpedig abból, mikor a rendszer teljesen szétüledett, rétegzett (23. ábra). A kísérleti tartályba (1) a teljes folyadéktérfogat felét  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$ -es oldattal töltöttem meg, mely alá rétegeztem be a hiányzó térfogatú,  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldatot. Ebben az esetben a térfogatáram a perisztaltikus pumpával (3) is szabályozva volt, hiszen a pumpa szívó ága közvetlenül a kísérleti tartály elvételi csonkjához csatlakozott. A perisztaltikus pumpa az oldatot a puffer tartályba szállította. A túlfolyó ebben az esetben is beépítésre került, de a 7-es jelű túlfolyó tartályban egyetlen kísérlet során sem jelent meg folyadék. A kísérleti tartályba a betáplálás továbbra is gravitációsan történt.



**23. ábra: Recirkulációs vizsgálat általános mérés elrendezése (1. kísérleti tartály, 3. perisztaltikus pumpa, 4. puffer tartály, 5. rotaméter, 7. túlfolyó tartály)**

### 2.4 Méretcsökkentés

A kutatómunkám alapját egy ipari probléma adta, mégpedig az, hogy egy  $\sim 90 \text{ m}^3$ -es tartályban, sűrűség különbség okozta rétegződésre hajlamos folyadékot tárolnak. A tartály tartalmára időközönként rátöltenek, a tartály átlagos sűrűségétől eltérő sűrűségű oldatot, majd a felhasználás előtt külső szivattyúval keringetik a kívánt homogenitás eléréséig. Az ipari tartályban az átlagos tartózkodási idő  $3.53 \text{ h}$  volt. Az ipari tartály fizikai paramétereit a 1. táblázatban tüntettem fel. A kislaboratóriumi vizsgálatok kivitelezésére egy  $0.194 \text{ m}$  átmérőjű hengeres tartály állt rendelkezésemre. A folyadékmagasság, átmérő arányt megtartva a

## Anyag és módszer

kislaboratóriumi tartály térfogata  $3.1 \text{ dm}^3$ . A méretcsökkentés esetén az átlagos tartózkodási időt állandónak tartottam. Azzal a feltételezéssel éltem, hogy az átlagos tartózkodási idő állandóságával a tartályokban kialakuló sebességek és sebességterek hasonlóak lesznek. Az átlagos tartózkodási idő azonosságából a kis laboratóriumi tartályba a betáplálás így  $8.782 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ -nak adódott.

### 1. táblázat: Ipari tartály fizikai paraméterei

Átmérő (m) ( $D_{ip}$ )	6.000
Folyadék magasság (m)	3.250
Töltőcsonk magasság (m)	3.720
Töltő csonk átmérő (m) ( $d_{ip}$ )	0.125
Szívócsonk magasság (m)	0.210
Szívócsonk átmérő (m)	0.220
Folyadék térfogat ( $\text{m}^3$ ) ( $V_{ip}$ )	91.850
Térfogatáram ( $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ )	26.000
Átlagos tartózkodási idő (h)	3.530
Betáplálási sebesség ( $\text{m} \text{ h}^{-1}$ )	2119.000

A kérdésem az volt, hogy a betáplálási csonk átmérőjét milyen módszerrel határozzam meg.

Első körben megvizsgáltam a geometriai méretcsökkentést.

#### 1. módszer: Geometriai méretcsökkentés

A tartózkodási idő az adott ( $\bar{t}_{ip} = \bar{t}_{kl} = 3.53 \text{ h}$ ), továbbá a két tartály átmérője. Így meg tudtam határozni a két átmérő arányát, mely 31-nek adódott (2-1).

$$G = \frac{D_{ip}}{D_{kl}} = \frac{6.000 \text{ m}}{0.194 \text{ m}} = 30.93 = 31 \quad 2-1$$

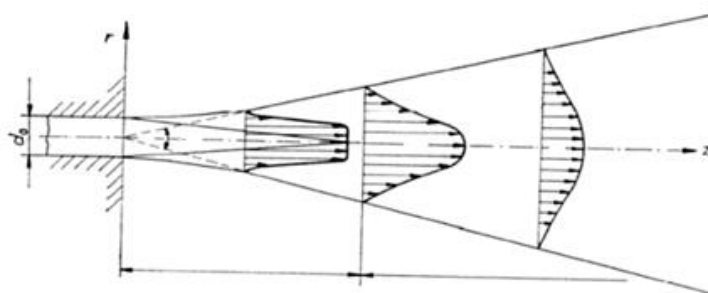
A geometriai méretcsökkentési aránnyal (31) számoltam a többi paramétert illetően is, így a betáplálási keresztmetszet a kis laboratóriumi tartályban 4 mm lett (2-2).

$$G = \frac{d_{ip}}{d_{kl}} = \frac{0.125 \text{ m}}{d_{kl}} = 31 \rightarrow d_{kl} = 0.004 \text{ m} \quad 2-2$$

## Anyag és módszer

### 2. módszer: Szabadsugár jellegű betáplálás

A nyíláson kiáramló folyadék- vagy gázsugár magával ragadja az azt körülvevő közeget. „A keletkezett sugárnyalábot, akkor nevezhetjük szabadnak, ha az áramlási keresztmetszete az áramlás tartományában a teljes áramlási keresztmetszet legfeljebb ötöde [72].” A szabad sugaraknak speciális áramlási képe (24. ábra) van, a kúp magjában az áramlási sebesség azonos, míg a kúp külső részében a súrlódás hatására nullára csökken. Egy bizonyos távolság után a belső kúp is elenyészik [7]. Az áramlás kialakulásának tartományának hossza kb. 5-6 torokátmérő ( $d_0$ ) (kiáramlás kezdeti átmérője).



**24. ábra: Szabad turbulens sugár áramlásterve [7] ( $d_0$ : kiáramlás kezdeti átmérője)**

A mérések előtt azzal a feltételezéssel éltem, hogy ha nem is turbulens áramlással, de szabad sugárra jellemző áramlási kép alakul ki a belépési pont után (25. ábra). Így az áramlás kialakulásának tartományát ( $z$ ) és a tartály átmérő ( $D$ ) arányát tartottam konstans értéken az átlagos tartózkodási idő mellett (2-3).

$$z = 5 \cdot d_0 \quad 2-3$$

Ipari tartály esetén az áramlás kialakulásának tartománya 0.625 m lett (2-4).

$$z_{ip} = 5 \cdot d_{0ip} = 5 \cdot 0.125 \text{ m} = 0.625 \text{ m} \quad 2-4$$

Az áramlás kialakulásának tartománya és a tartály átmérő aránya (2-5) az ipari méretű tartály esetén 9.6 lett.

$$\frac{D_{ip}}{z_{ip}} = \frac{6 \text{ m}}{0.625 \text{ m}} = 9.6 \quad 2-5$$



**25. ábra: A belépő 1013.6 kg m<sup>-3</sup> oldat áramlási képe**

A kis laboratóriumi tartály átmérője ( $D_{kl}$ ) és a 9.6 arány ismeretében, a kis laboratóriumi tartályra jellemző kezdeti áramlási tartomány hossza ( $z_{kl}$ ) (2-6) és abból a torok átmérő számítható ( $d_{0kl}$ ) (2-7).

$$9.6 = \frac{D_{kl}}{z_{kl}} = \frac{0.194 \text{ m}}{z_{kl}} \rightarrow z_{kl} = 0.02 \text{ m} \quad 2-6$$

$$z_{kl} = 5 \cdot d_{0kl} \rightarrow d_{0kl} = 0.004 \text{ m} \quad 2-7$$

Ebben az esetben a geometria méretcsökkentéssel megegyező betáplálási cső átmérő jött ki, mely nem meglepő, hisz mindkét módszer geometriai alapokon nyugszik.

### **3. módszer: Térfogat fajlagosra jutó betáplált kinetikus energia**

A 3. módszer alkalmazásakor a rendszerbe juttatott kinetikus energiát térfogatra normált formában ( $M$ ) [73] (2-8) tartottam konstansnak az átlagos tartózkodási idő mellett. A sűrűségként a tömény oldat 1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségét vettem, a sebesség a betáplálási keresztmetszetre számított sebesség.

$$M = \frac{0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}{V} \quad 2-8$$

Az ipari tartályra végzett számításom 0.02346 kg m<sup>-2</sup> s<sup>-2</sup>-ot eredményezett.

$$M_{ip} = \frac{0.5 \cdot 1013.6 \text{ kg m}^{-3} \cdot (0.5886 \text{ m s}^{-1})^2 \cdot 0.01227 \text{ m}^2}{91.845 \text{ m}^3} \quad 2-9$$
$$= 0.02346 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-2}$$

Az ipari tartályra kapott értéket megfelelően a kis laboratóriumi tartályba vezetett térfogategységre jutó kinetikus energiával a belépési cső keresztmetszet ( $A_{kl}$ ) könnyen számítható (2-10).

## Anyag és módszer

$$\begin{aligned} M_{kl} &= M_{ip} = 0.02346 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-2} \\ &= \frac{0.5 \cdot 1013.6 \text{ kg m}^{-3} \cdot \left( \frac{2.4394 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}}{A_{kl}} \right)^2 \cdot A_{kl}}{0.0031 \text{ m}^3} \end{aligned} \quad 2-10$$

A belépési csomk felületből a csomk átmérő meghatározható (2-11).

$$A_{kl} = 4.1469 \cdot 10^{-7} = \frac{d^2 \pi}{4} \rightarrow d = 7.24 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad 2-11$$

A kis laboratóriumi tartály belépési csomk átmérőjére 1 mm-nél kisebb méretet számítottam.

### 4. módszer: Betáplálási csomk Re számainak azonossága

Megvizsgáltam, hogy milyen belépési keresztmetszet jön ki abban az esetben, ha a belépési csomkra jellemző Re-számot tartom állandónak a tartózkodási idő azonos értéke mellett.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad 2-12$$

$$Re_{ip} = \frac{0.5886 \text{ m s}^{-1} \cdot 0.125 \text{ m}}{10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}} = 73575 \quad 2-13$$

$$\begin{aligned} Re_{kl} = Re_{ip} = 73575 &= \frac{\frac{2.4394 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}}{A_{kl}} \cdot d}{10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}} \\ &\rightarrow d = 4.22 \cdot 10^{-6} \text{ m} \end{aligned} \quad 2-14$$

Látható, hogy ebben az esetben még kisebb csomk átmérőt kaptam eredményül. A különböző módszerekkel számított paraméterek a 2. táblázatban olvasható.

Látható, hogy mind a Re-szám, mind a fajlagos térfogatra jutó kinetikus energia állandó értéken tartása esetén a kis laboratóriumi tartály betáplálási csomkátméreje kisebb, mint 1 mm. A laboratóriumban megfigyeltem, hogy az adott térfogatáram mellett az 1 mm átmérőjű csomkon bevezetett oldat a betáplálási csomkkal szemben lévő tartályfalra csapódott be, így az 1 mm-es betáplálási csomkot elvettem.

## Anyag és módszer

2. táblázat: Különböző módszerekkel kapott eredmények összefoglalása

	Ipari tartály	Kislaboratóriumi tartály			
		1. módszer	2. módszer	3. módszer	4. módszer
Átmérő (m)	6	0.194			
Térfogat (m <sup>3</sup> )	91.85	3·10 <sup>-3</sup>			
Átlagos tartózkodási idő (h)	3.53				
Térfogatáram (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	26	8.782·10 <sup>-4</sup>			
Betáplálási csonkátmérő (m)	0.125	0.004	0.004	7.24·10 <sup>-4</sup>	4.22·10 <sup>-6</sup>
Betáplálási sebesség (m s <sup>-1</sup> )	0.5886	0.01942	0.01942	0.5886	17449.7
Re-szám (-)	73575	77.69	77.69	425.15	73575

Mivel a szabadsugár elvén történő számítás és a geometriai méretcsökkentés esetén is ugyanakkora betáplálási csonk átmérőt kaptam szabadsugár számításmenetet elvettem az egyszerűbb számítás végett. A méretcsökkentést és – növelést az állandó tartózkodási idő, 3.53 h biztosítása mellett, a tartály átmérők arányaiban végeztem. Az így kapott méretnövelési arányok, mind átmérő, mind térfogat tekintetében a 3. táblázatban olvasható.



3. táblázat: Különböző méretű kísérleti tartályok arányai

	Ipari	Nagy laboratóriumi	Kis laboratóriumi
Átmérő (m)	6	0.5	0.194
Arányok	$\frac{D_{ip}}{D_{nl}} = \frac{6}{0.5} = 12$	$\frac{D_{nl}}{D_{kl}} = \frac{0.5}{0.194} = 2.58$	
	$\frac{D_{ip}}{D_{kl}} = \frac{6}{0.194} = 31$		
Térfogat (m <sup>3</sup> )	91.845	$53.2 \cdot 10^{-3}$	$3.1 \cdot 10^{-3}$
Arányok	$\frac{V_{ip}}{V_{nl}} = \frac{91.845}{53.2 \cdot 10^{-3}} = 1726$	$\frac{V_{nl}}{V_{kl}} = \frac{53.2 \cdot 10^{-3}}{3.1 \cdot 10^{-3}} = 17$	
	$\frac{V_{ip}}{V_{kl}} = \frac{91.845}{3.1 \cdot 10^{-3}} = 29627$		

## 2.5 Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály

A kis laboratóriumi, hengeres tartályban végzett kísérletek célja a belépő és kilépő csomak vertikális pozíciójának a keverésre gyakorolt hatásainak vizsgálata volt. A kísérleti tartály paramétereinek meghatározása a 2.4 fejezetben bemutatottak szerint történt.

A kísérletekre egy 3.1 liter folyadék térfogatú, 194 mm átmérőjű, poli-propilénből készült, egy hengeres tartályt alkalmaztam. A tartályban a választott tartózkodási idő 3.53 h volt. A folyadék térfogatból és az átlagos tartózkodási időből adódó térfogatáram  $0.878 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , ami  $14.6 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ -nek felel meg. A folyadékszint minden kísérlet esetén 105 mm magasságban volt. A belépő és kilépő csomak 4 mm átmérőjűek voltak és  $110^\circ$ -os szöget zártak be egymással. A vizsgálat során több tartályt alkalmaztam, melyek minden tulajdonságban megegyeztek a kilépő és belépő csomak pozíciójától eltekintve.

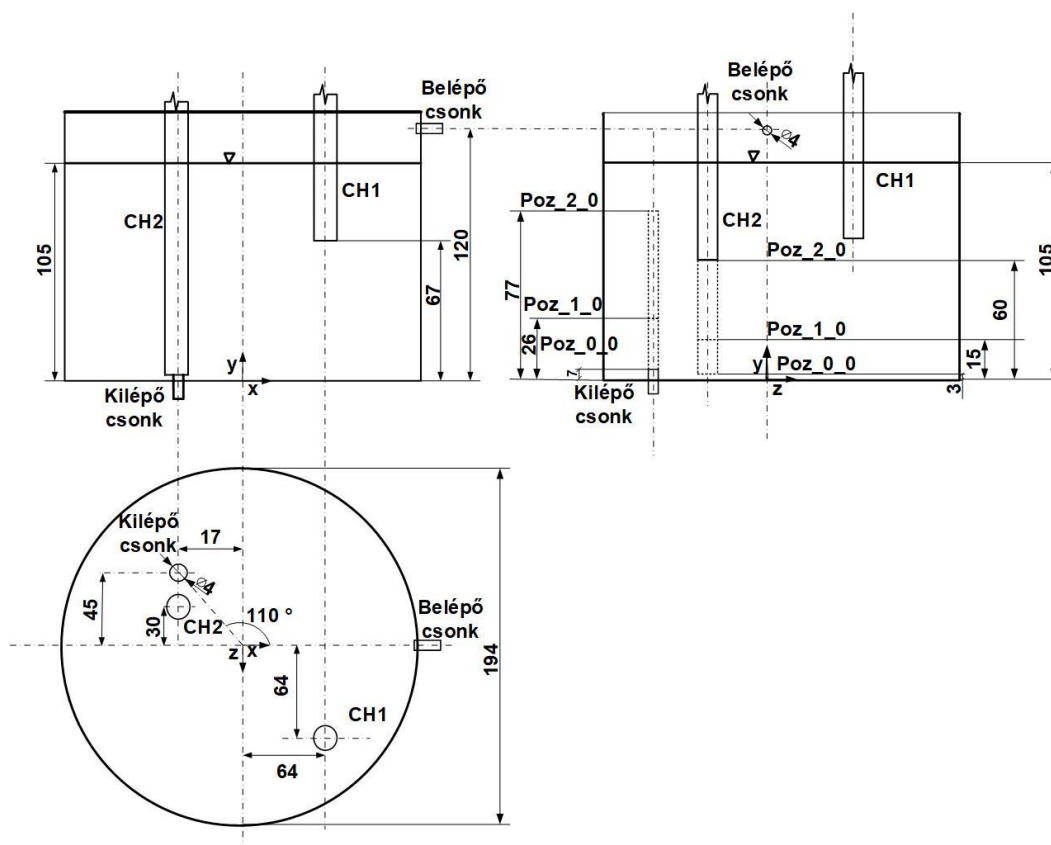
A kis laboratóriumi tartályban végzett kísérletek során használt jelölésjegyzékben pl.: poz\_0\_0, az első szám karakter a nyomócsomak y irányú pozícióját, míg a második a belépő csomak magasságát jellemzi.

A szívócsomak pozíciójának keverés hatékonyságára gyakorolt hatásának vizsgálatakor a nyomócsomak mindig a folyadékszint fölött a „0”-s pozícióban és a

## Anyag és módszer

szívócsont pozíciója három különböző magasságban volt (0, 1, 2). Így állnak elő a poz\_0\_0, poz\_1\_0 és poz\_2\_0 jelölésű kísérletek.

A nyomócsont hatásainak tanulmányozásakor a szívócsont a tartály feneke felett 7 mm-re a „0”-s pozícióban volt és a nyomócsont négy különböző magasságban volt elhelyezve. Az alkalmazott jelölések poz\_0\_0, poz\_0\_1, poz\_0\_2 és poz\_0\_3. A 0,0,0 pont minden esetben a tartály aljának középpontja volt.



**26. ábra: Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály sematikus rajza a kilépő csont pozíciójának vizsgálata céljából**

Az elvételi csont hatásainak feltérképezése céljából 3 pozíciót vizsgáltam (26. ábra). A poz\_0\_0 esetben az elvételi csont 7 mm, poz\_1\_0 esetén 26 mm, míg poz\_2\_0 esetben 77 mm magasságban volt. A belépő csont minden esetben a szimmetria síkban 120 mm-en került elhelyezésre. A CH1-es elektród mindig ugyan abban a pontban volt pozícionálva, míg a CH2-es elektród a kilépő csont magasságával változott (4. táblázat).

## Anyag és módszer

### 4. táblázat: Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály belépő, kilépő csonkjának és az elektródoknak helykoordinátája (mm) a kilépő csonk pozíciójának vizsgálata céljából

	Kilépő csonk (x,y,z)	Belépő csonk (x,y,z)	CH1 (x,y,z)	CH2 (x,y,z)
poz_0_0	-17;7;-45	97;120;0	64;67;64	-17;3;-30
poz_1_0	-17;26;-45			-17;15;-30
poz_2_0	-17;77;-45			-17;60;-30

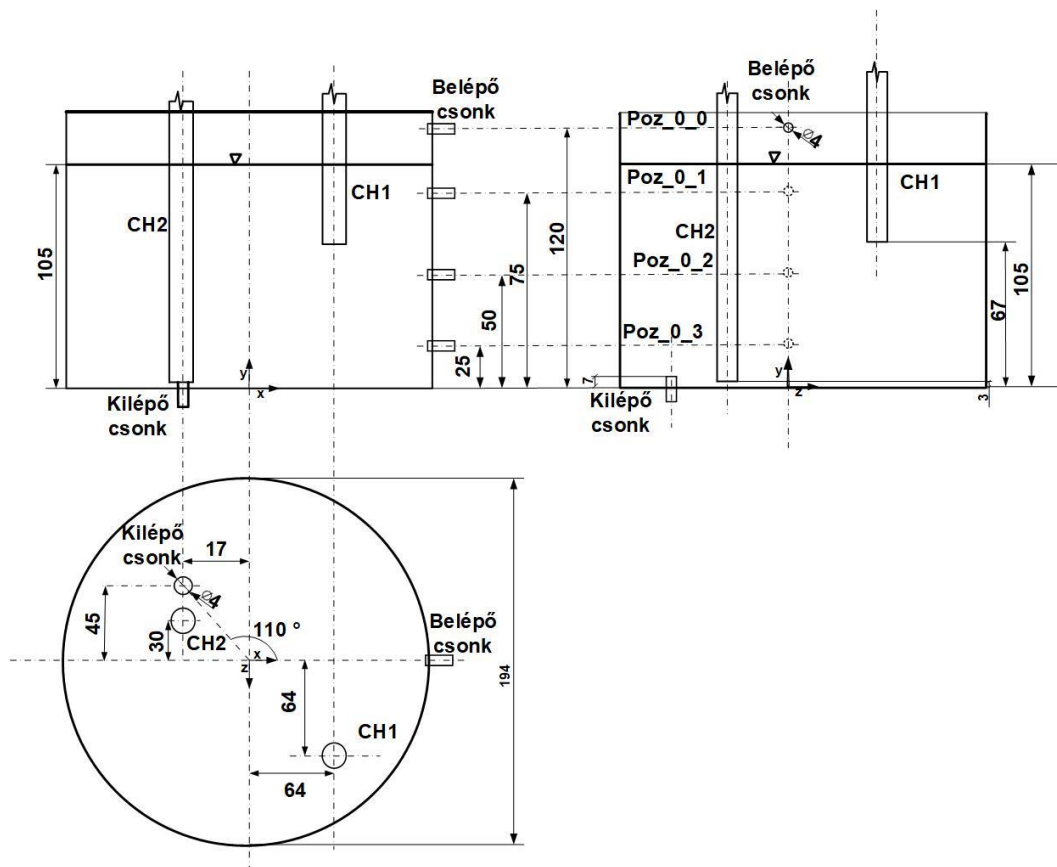
A belépő csonk pozíciójának vizsgálatakor (5. táblázat, 27. ábra) négy különböző magasságba helyeztem a belépő csonkot. Egyik esetben a folyadékszint fölött volt, míg 3 esetben a folyadékszint alatt. Az elvételi csonk 7 mm magasságban volt pozícionálva ezen kísérletek során.

### 5. táblázat: Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály belépő, kilépő csonkjának és az elektródoknak helykoordinátája (mm) a belépő csonk pozíciójának vizsgálata céljából

	Kilépő csonk (x,y,z)	Belépő csonk (x,y,z)	CH1 (x,y,z)	CH2 (x,y,z)
poz_0_0	-17;7;-45	97;120;0	64;67;64	-17;3;-30
poz_0_1		97;75;0		
poz_0_2		97;50;0		
poz_0_3		97;25;0		

A további vizsgálat céljából a fent bemutatott csonk pozíciókat kombináltam. Poz\_1\_1 esetén a szívócsonk 26 mm, míg a nyomócsonk a folyadék felszíne alatt 75 mm volt. Poz\_2\_3 csonkpozíció alkalmazásakor a szívócsonk 77 mm-en a nyomócsonk 25 mm, míg poz\_2\_1 során a szívócsonk 77 mm-en és a nyomócsonk 75 mm volt.

## Anyag és módszer



27. ábra: Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály sematikus rajza a belépő csonk pozíciójának vizsgálata céljából

6. táblázat: Kis laboratóriumi, egy hengeres tartály belépő, kilépő csonkjának és az elektródoknak helykoordinátája (mm) kombinált csonk pozíciók vizsgálata céljából

	Kilépő csonk (x,y,z)	Belépő csonk (x,y,z)	CH1 (x,y,z)	CH2 (x,y,z)
poz_1_1	-17;26;-45	97;75;0		-17;15;-30
poz_2_3	-17;77;-45	97;25;0	64;67;64	-17;60;-30
poz_2_1	-17;77;-45	97;75;0		-17;60;-30

A mérések végeztével minden esetben, a tartály szimmetria tengelye mentén, különböző magasságokban mintát vettem majd, manuálisan összekevertem a tartály

## Anyag és módszer

tartalmát. A mintavételi pontok minden kis laboratóriumi, egy hengeres tartályban végzett kísérlet esetén ugyanott voltak.

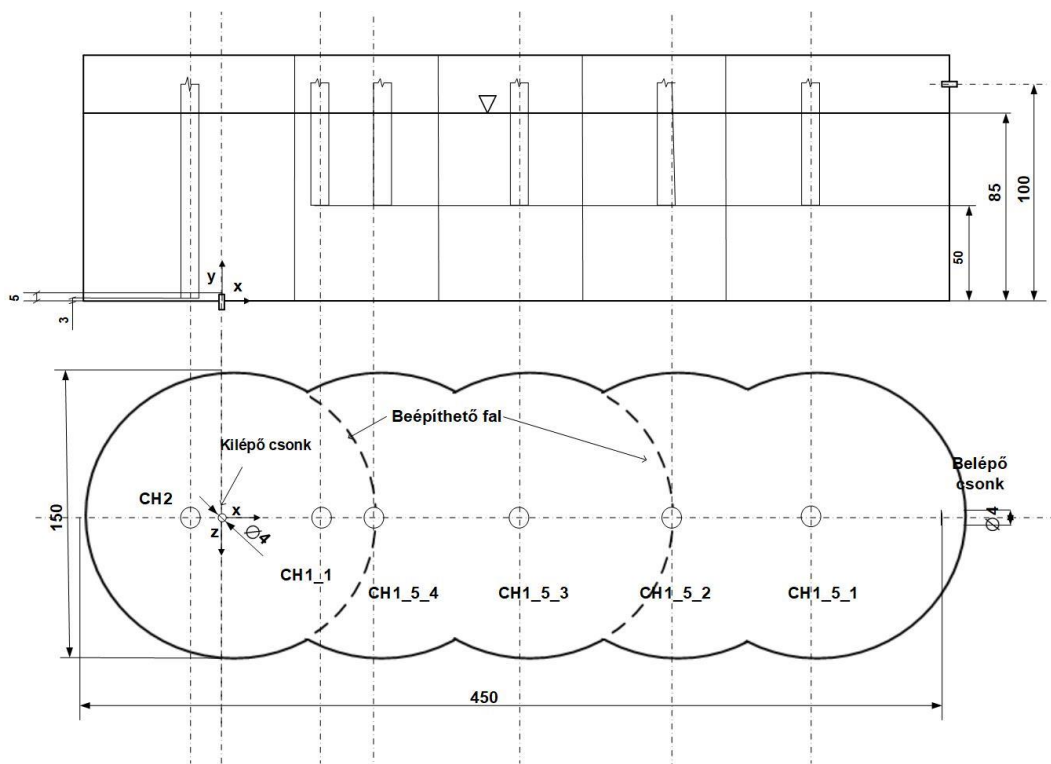
### 7. táblázat: Kísérlet utáni mintavételi helyek a kis laboratóriumi, egy hengeres tartály esetén

x (mm)	y (mm)	z (mm)
0	y <sub>1</sub> =3 y <sub>2</sub> =25 y <sub>3</sub> =55 y <sub>4</sub> =75	0

## 2.6 Kis laboratóriumi, több hengeres tartály

A kísérleti tartály (28. ábra) kialakítása öt, nyitott egyenként 150 mm átmérőjű állóhenger egybeépítésével valósult meg. A hengerelemek számát egy beépíthető válaszfal segítségével lehetett változtatni. A válaszfalon a beömlő csomók kialakításra kerültek. A kísérleti tartály poli-vinil-kloridból készült. A tartály belépő és kilépő csomói a hosszanti szimmetriasisímban helyezkedtek el. Mindegyik csomók átmérője 4-4 mm volt. A 0;0;0 pont az elvételi csomót tartalmazó henger alapjának középpontja. A folyadék betáplálása a folyadékszint fölött történt, 100 mm-en. A kilépő csomók 5 mm-re nyúlt be a szimmetria tengely irányába, mely a szereléshez használt tömszelence rögzítő csavar vastagsága miatt volt szükséges. A folyadékszint, a hengerelem számtól függetlenül, állandóan 85 mm-re volt beállítva.

## Anyag és módszer



**28. ábra: Kis laboratóriumi, több hengeres tartály sematikus rajza**

A CH2-es elektród a hengerelem számától függetlenül mindig a kilépő csomk mellett volt elhelyezve, ugyanabban a pozícióban (8. táblázat). A CH1-es elektród a hosszanti szimmetria síkban volt pozícionálva, 50 mm-es magasságban, de a hengerelem számától függően x koordinátája változott.

A kis laboratóriumi, több hengeres tartályban végzett kísérletek célja a geometria hatásainak feltérképezése volt a keverésre, továbbá vizsgáltam a hengerelemek számának a hatását a tartózkodási idő eloszlás függvényre és a tartózkodási idő várható értékre.

5 hengert tartalmazó tartály esetén egy kísérletet négyszer megismételtem annak érdekében, hogy kiderítsem a CH1-es elektród megfelelő helyét.

Ahhoz, hogy a geometria hatásait fel tudjam térképezni a tartózkodási idő értékét tartottam állandóan, így a térfogat és a térfogatáram változott a különböző geometriák esetén (9. táblázat).

## Anyag és módszer

**8. táblázat: Kis laboratóriumi, több hengeres tartály belépő, kilépő csonkjának és az elektródoknak helykoordinátája (mm)**

Hengerelem száma	Jelölés	Kilépő csonk	Belépő csonk	CH1	CH2
1	1	0;5;0	75;100;0	70;50;0	-15;3;0
3	3		225;100;0	150;50;0	
5	5_1		300;50;0		
	5_2		225;50;0		
	5_3		150;50;0		
	5_4		75;50;0		

**9. táblázat: Mérési paraméterek a kis laboratóriumi, több hengeres tartály esetén**

Hengerelemek száma	Tartózkodási idő (h)	Folyadék térfogat (m <sup>3</sup> )	Térfogat áram (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )
1	3	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$
3		$3.3 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
5		$5.2 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$

A kísérletek befejeztével minden esetben mintát vettem a tartály szűkületi pontjaiból, különböző magasságokból (10. táblázat). 5 hengerelemet tartalmazó tartály esetén a hossz menti szimmetria tengelyen négy ponton, 3 hengerelem vizsgálatakor két ponton, míg egy hengerelem esetén egy ponton.

**10. táblázat: Kísérlet utáni mintavételi helyek a kis laboratóriumi, több hengeres tartály esetén**

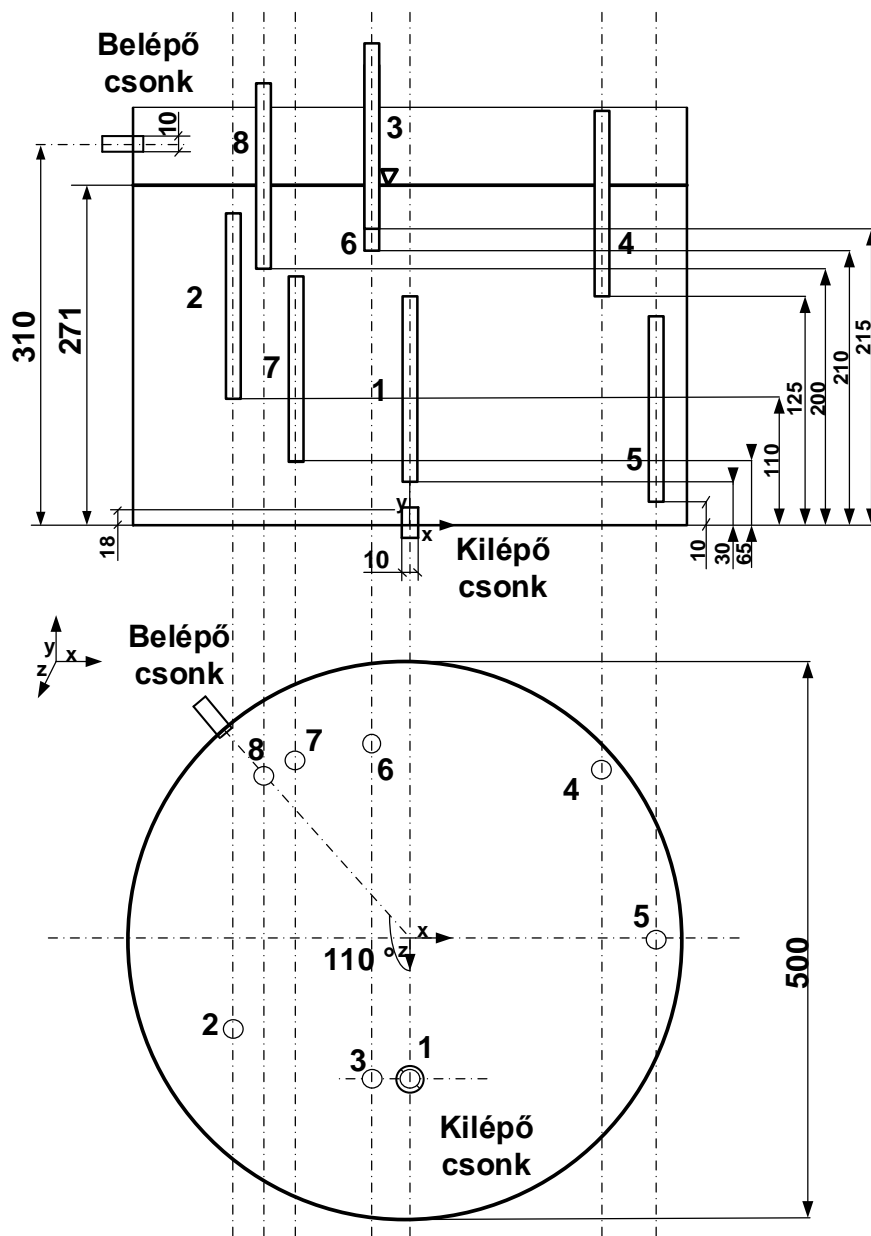
Hengerelem szám	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	$x_4=37.5$	$y_1=0$ $y_2=25$ $y_3=55$ $y_4=85$	0
3	$x_{3_4}=37.5$ $x_{3_3}=112.5$		
5	$x_{5_4}=37.5$ $x_{5_3}=112.5$ $x_{5_2}=187.5$ $x_{5_1}=262.5$		

## 2.7 Nagy laboratóriumi, egy hengeres tartály

A nagy laboratóriumi egy hengeres tartályban a mérések célja a méretnövelés hatásainak vizsgálata volt.

A kísérletek a 2.4 fejezetnek megfelelően számított tartályban kerültek kivitelezésre. A kísérleti berendezés 0.5 m átmérőjű egyhengeres, nyitott, poli-metil-metakrilátból készült tartály volt (29. ábra). A tartály további fizikai jellemzőit, a kis laboratóriumi tartály alapján számítottam, úgy hogy a tartózkodási idő konstans 3.53 h legyen és a geometriai paraméterek 2.58-szorosa legyen a kis laboratóriumi társáénak. A tartályban 0.271 m volt a folyadékmagasság, ennek megfelelően a folyadék térfogat  $53.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ -nek adódott. A szívó- és nyomócsonk  $110^\circ$ -os szöget zártak be egymással. A nyomócsonk a folyadékfelszín felett 0.310 m-es magasságban, a hengerpaláston helyezkedett el. A belépési csonk átmérő 0.01 m volt. A szívócsonk 0.01 m átmérőjű volt, mely 18 mm-re nyúlt be a szimmetria tengely felé. A betáplálási térfogatáram  $15 \text{ l h}^{-1}$ -nak adódott.





29. ábra: Nagy laboratóriumi tartály sematikus rajza

A nagy laboratóriumi kísérletek során 8 csatornás vezetőképesség-mérő (2.1.2. fejezet) állt rendelkezésemre. Az elektródok pozícionálásánál arra törekedtem, hogy a tartályban egyenletesen helyezzem el őket, így szerevezve információt a tartály nagy részéről. Az elektródok közül az 1-es jelű elektród a kilépési csonk, míg 8-as jelű a belépési csonk környezetét mintavételezte. Az 11. táblázat bemutatja az elektródok pozíciójának koordinátáit mm-ben. A 0,0,0 pontot a henger alapjának középpontjában határoztam meg.

## Anyag és módszer

**11. táblázat: Nagy laboratóriumi, egy hengeres tartály belépő, kilépő csonkjának és az elektródok helykoordinátái (mm)**

	<b>x;y;z</b>
<b>Belépő csonk</b>	-235;310;-86
<b>Kilépő csonk</b>	0;18;125
<b>1</b>	0;30;125
<b>2</b>	-150;110;90
<b>3</b>	-10;215;125
<b>4</b>	140;125;-180
<b>5</b>	-22;10;-180
<b>6</b>	-10;210;-150
<b>7</b>	-125;65;-90
<b>8</b>	-140;200;-70

### 2.8 Szimulációs vizsgálat

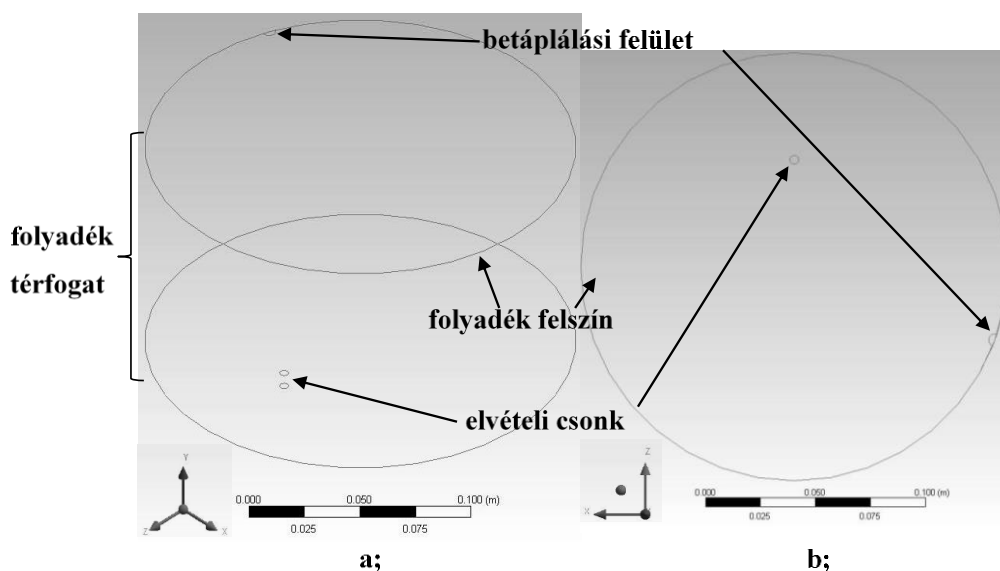
Az egyhengeres tartályokban történő keverés áramlástanai tulajdonságainak részletesebb tanulmányozása céljából CFD szimulátorral végeztem vizsgálatokat. A keverés elemzése mellett a méretnövelés helyességét is célt volt tanulmányozni, így megalkottam az ipari méretű egyhengeres tartály geometriáját is. Az alkalmazott program az ANSYS Fluent volt. A szimuláció során négy feladatot kellett elvégezni, a geometria megalkotása, háló készítés, számítási feladat beállítása és kiértékelés.

Két különböző vizsgálatot folytattam. Az egyik a tartózkodási idő meghatározása céljából történt, míg a másik a recirkulációs keverés részletes elemzése végett. A három különböző méretű tartály (kis-, nagy laboratóriumi, ipari) vizsgálata egyformán történt. A különbségek a méretből, így a pontos geometriából fakadtak. A vizsgálati módszert részletesen a kis laboratóriumi, egy hengeres tartályon (2.5. fejezet) mutatom be.

### 2.8.1 Tartózkodási idő szimulációs meghatározása

A modellezésben csak a folyadék fázist vettem figyelembe, mivel a laboratóriumi kísérletek során a betáplált oldat a tartály falán folyt le, így nem tapasztaltam fröcskölést illetve jelentős keverő hatását a betáplált folyadéknak. A tartózkodási idő meghatározása céljából leképezett geometria során így egy fázisú folyadék rendszert alkottam.

A kis laboratóriumi, egyhengeres tartály (2.5. fejezet) esetén a folyadék magasság 105 mm volt, a betáplálási térfogatáram  $0.87 \text{ l h}^{-1}$ , a szívó és nyomó csomók átmérője 4-4 mm. Az elvételi csomk 7 mm-re nyúlik be a tartály szimmetria tengelye felé.



**30. ábra: A kis laboratóriumi tartály leképezett geometriája tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok céljából a; iso nézet b; felül nézet**

A tartályt képező henger alapjának középpontja volt az origó (30. ábra). A tartályt jellemző geometria paraméterek (12. táblázat) közül a betáplálási felület sugara kíván némi magyarázatot. A betáplálási felületet félkörként határoztam meg, mivel a betáplált oldat a tartály falon folyt le. A betáplálási felület keresztmetszetét a betáplálási csomk átmérőjéből határoztam meg, mely  $1.256 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ -nek adódott. Mivel a teljes  $1.256 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  felület szükséges a megfelelő betáplálási sebesség biztosításához, továbbá a betáplálási felületet félkörként kívántam kialakítani, így

## Anyag és módszer

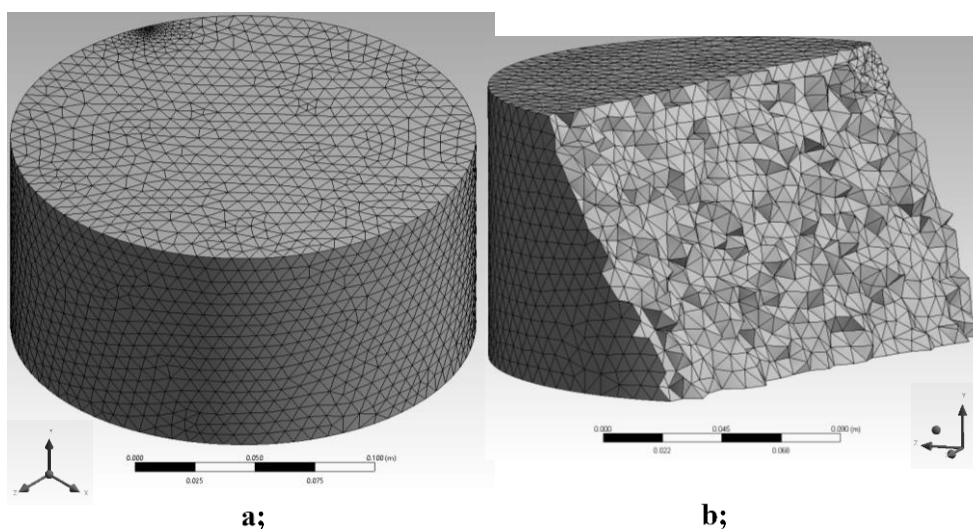
a betáplálási felület sugarának meghatározásához, e felület kétszeresét vettem (2-15 egyenlet).

$$r = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot A \cdot 4}{3.14}}}{2} = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot 1.256 \cdot 10^{-5} \cdot 4}{3.14}}}{2} = 2.829 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad 2-15$$

**12. táblázat: Kis laboratóriumi tartály leképzett geometriájának paraméterei [m]**

	Tartály	Betáplálási felület	Elvételi csonk
<b>x</b>	0.000	$-9.115 \cdot 10^{-2}$	0.000
<b>y</b>	0.105	0.105	$7.000 \cdot 10^{-3}$
<b>z</b>	0.000	$3.318 \cdot 10^{-2}$	$4.850 \cdot 10^{-2}$
<b>sugár</b>	$9.700 \cdot 10^{-2}$	$2.829 \cdot 10^{-3}$	$2.000 \cdot 10^{-3}$

A geometria leképezése után a tartály hálózása (31. ábra) következik. A helyes háló kiválasztása összetett feladat mivel meg kell vizsgálni azt, hogy a hálóbeosztás hogyan befolyásolja a kapott eredményeket. A hálózásnál tetraéderes cellákat hoztam létre és úgynevezett „conformal” hálót, mely egységesebb hálózást biztosított, így könnyítve a számolás menetét. A program a hálózást automatikusan hozza létre, mely során sűríti az elemek számát a betáplálási és elvételi pontnál, hiszen azok mérete a tartály méreténél jóval kisebbek.



**31. ábra: Kis laboratóriumi tartály hálója a; iso nézetben b; tetraéderes háló**

## Anyag és módszer

A hálózást követően a számolási metódus beállítása következik. A szakirodalmak alapján a recirkulációs problémák megoldására a k-ε turbulens módszert javasolják a lamináris módszer mellett [74], így a turbulens modellek közül a Realisable k-ε modellt választottam a falhatás (Enhanced Wall Treatment) hangsúlyozott figyelembevételével. Ezen túlmenően az energiamérleg számítását is bekapcsoltam. A program az aktuális bórax sűrűséget (2-16 egyenlet) a koncentráció segítségével számítja [75].

$$\rho = 0.4977 \cdot c + 999.1 \quad 2-16$$

A vizsgálatokat gravitációs térben végeztem, a gravitációs gyorsulás értéke konstans  $9.81 \text{ m s}^{-2}$  volt. A számítás mindig stacioner esettel kezdem a sebességtér rögzítése miatt. 200 iteráció után tranziens módba kapcsolom a programot. Tartózkodási idő eloszlás vizsgálat esetén, amennyiben az oldat térfogat  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségnek megfelelő koncentrációval volt definiálva, akkor a betáplált oldat  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségnek megfelelő oldatkonzentráció volt (negatív ugrás függvény). A számítást fordított esetre is elvégeztem (pozitív ugrás függvény). Az elvételi csonkon a visszakeveredő oldat koncentrációját kellett definiálni, ehhez egy C-nyelven írt UDF-fájlt (User defined function) alkalmaztam. A program működésének a lényege, hogy a kilépési felületen gyűjtjük a koncentráció adatokat, majd átlagoljuk a felületen lévő csomópontok számával és adott idővel (1 timestep) eltolva ez az érték lesz a visszakeveredési koncentráció (3. Melléklet). A kis laboratórium tartály esetén 4 sec-ot feleltettem meg 1 time step-nek és 9900 time step-ig futtattam a programokat, mely 11 h valós időnek felel meg.

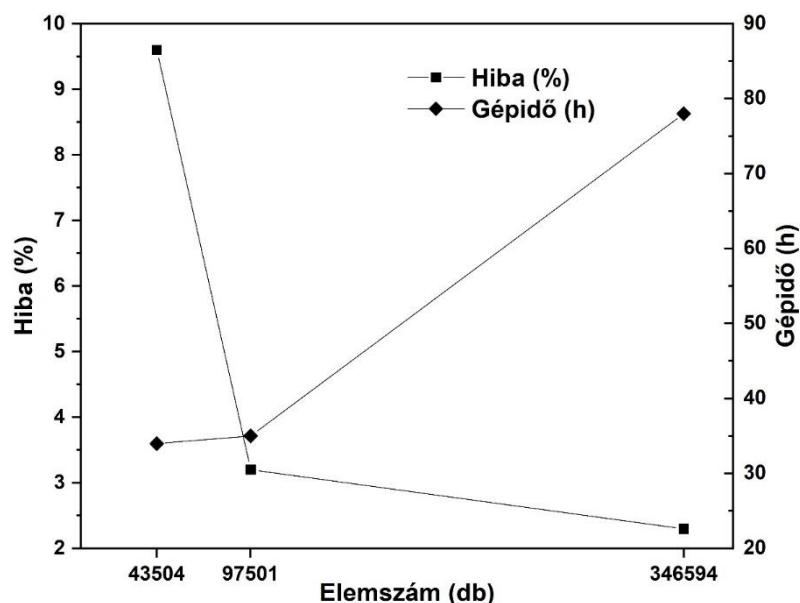
A korábban említett hálófüggetlenségi elemzést a negatív egységugrás betáplálás esetére végeztem el. A vizsgálatához három térháló beosztást választottam (13. táblázat). A kapott eredményeket a szükséges gépidő és az elvételi csonkon detektált sűrűség és az elvárt sűrűség közti különbség (hiba) alapján hasonlítottam össze. Cél volt 5 % alatti hiba elérése a lehető legkisebb gépidő mellett. A szimulációk futtatásához használt személyi számítógép Intel®Core™ i7-6700 CPU processzorral és 32 GB memóriával rendelkezik, így a bemutatott gépidők erre a hardveres infrastruktúrára és az általam használt szimulációs beállításokra (mentési időközök=60 sec) vonatkozik.

## Anyag és módszer

13. táblázat: Kis laboratóriumi tartály háló függetlenségi vizsgálata

<b>Elem szám (db)</b>	43 504	97 501	346 594
<b>Csomópont szám (db)</b>	8 174	18 036	61 799
<b>Minimális cella térfogat (m<sup>3</sup>)</b>	$1.4 \cdot 10^{-11}$	$7.9 \cdot 10^{-12}$	$1.2 \cdot 10^{-12}$
<b>Maximális cella térfogat (m<sup>3</sup>)</b>	$6.9 \cdot 10^{-7}$	$9.3 \cdot 10^{-8}$	$2.3 \cdot 10^{-8}$

A kis laboratóriumi tartályon végzett hálófüggetlenségi vizsgálat eredményeül (32. ábra) azt kaptam, hogy a legdurvább hálóbeosztás (43 504 db elem) során kapott hiba jelentősen 5 % fölött van, így ezt a hálóbeosztást nem fogadtam el. A másik két elemszámú háló esetén 5 % alatti hibát kaptam. A 346 594 elemet tartalmazó háló esetén a hiba csak 2.3 %, azonban a szükséges gépidő több mint 3 nap volt. 97 501 elemű háló vizsgálatával a hiba bőven 5 % alatti (3.2 %) továbbá a gépidő is jóval kisebb (35 h), mint a legfinomabb háló beállításnál, így ezt a hálóbeállítást választottam a további vizsgálatokhoz.



32. ábra: Kis laboratóriumi tartályon végzett hálófüggetlenségi vizsgálat eredménye

A szakirodalom szerint a recirkulációs problémákra ebben a sebességtartományban lamináris és  $k - \epsilon$  turbulens modellt alkalmaznak [69]. A

## Anyag és módszer

modell kiválasztásához a korábban bemutatott hálóbeosztással és számítási módszerrel lamináris modellel is végeztem számítást. Az elvételi csonkon rögzített sűrűséget és az elvárt sűrűséget összehasonlítva (14. táblázat) azt tapasztaltam, hogy a  $k - \epsilon$  turbulens modell esetén kisebb hibát kapok eredményül, így a további számításokhoz ezt a modellt alkalmaztam.

### 14. táblázat: Lamináris és $k - \epsilon$ turbulens modellel kapott eredmények összehasonlítása

modell	lamináris modell	$k - \epsilon$ turbulens modell
elemszám	97 501	
hiba (%)	7.7	3.2

Kis laboratóriumi tartályokban a keverést tanulmányoztam gravitációmentes térben is a célból, hogy megfigyeljem a kényszer és szabad konvekció hatását, hiszen gravitációmentes térben a sűrűségkülönbség hatására nem léphet fel áramlás.

A nagy laboratóriumi tartály geometriájának leképezése (4. Melléklet) 2.7. fejezetben szereplő paraméterek alapján történt. A betáplálási sebesség  $0.05308 \text{ m s}^{-1}$  volt, a betáplálási felület átmérője  $0.014 \text{ m}$ . A hálófüggetlenségi vizsgálatot (5. Melléklet) ez esetben is elvégeztem, a  $261\,900$  db elemet tartalmazó hálószerű készített számítás eredményeit fogadtam el és mutatom be a későbbiekben. A számítás során  $4 \text{ sec}$ -ot feleltetem meg  $1 \text{ time step}$ -nek.

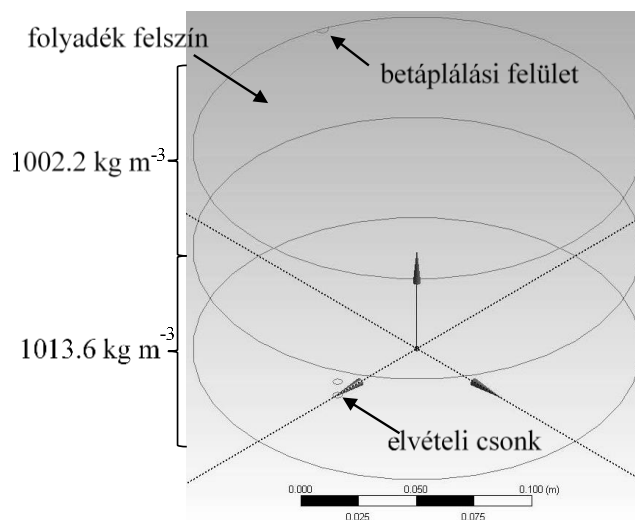
Az ipari tartály geometriáját az 1. táblázatban szereplő adatok szerint alkottam meg (6. Melléklet). A betáplálási sebesség  $0.5888 \text{ m s}^{-1}$  volt, a betáplálási felület átmérője  $0.088 \text{ m}$ . A hálófüggetlenségi vizsgálatot (7. Melléklet) ez esetben is elvégeztem, a  $33\,039$  db elemet tartalmazó háló eredményeit fogadom el és mutatom be a későbbiekben. A számítás során  $6 \text{ sec}$  valós idő felelt meg  $1 \text{ time step}$ -nek.

### 2.8.2 Recirkuláció szimulációs vizsgálata

Recirkuláció vizsgálata során a laboratóriumban végzett kísérletekhez hasonlóan abból a szélsőséges esetből indultam ki, mikor a tartályban lévő oldat teljesen rétegzett, alul  $1013.6$  fölötté  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat található.

## Anyag és módszer

A rétegzett rendszer kialakítására a geometria megalkotása során került sor, majd a számítási módszer beállításánál az adott réteget a megfelelő sűrűséggel azonosítottam. A geometria semmiben nem különbözik a tartózkodási idő méréseknél bemutatott geometriáktól, csak a folyadéktérfogatot a folyadék magasság felénél elvágtam, így hozva létre a két réteget.



**33. ábra: Kis laboratóriumi tartály recirkulációs vizsgálatára készített geometria**

A recirkulációt egy C-nyelven írt UDF-fájllal valósítottam meg (8. Melléklet). Ez a program valójában hasonló az elvételi csonkon visszakeveredő oldat koncentrációját (3. Melléklet) definiálóhoz. A program a korábbiakban bemutatottak szerint működik azzal a különbséggel, hogy nem csak a visszakeveredő oldat koncentrációját határozza meg, hanem a betáplált oldatét is az elvételi csonkon vett átlaggal. A visszakeveredés esetén 1, míg a betáplált oldat esetén 2 time step holtidőt állítottam be.



### 3 Eredmények és kiértékelés

#### 3.1 Szívócsonk pozíciójának hatása

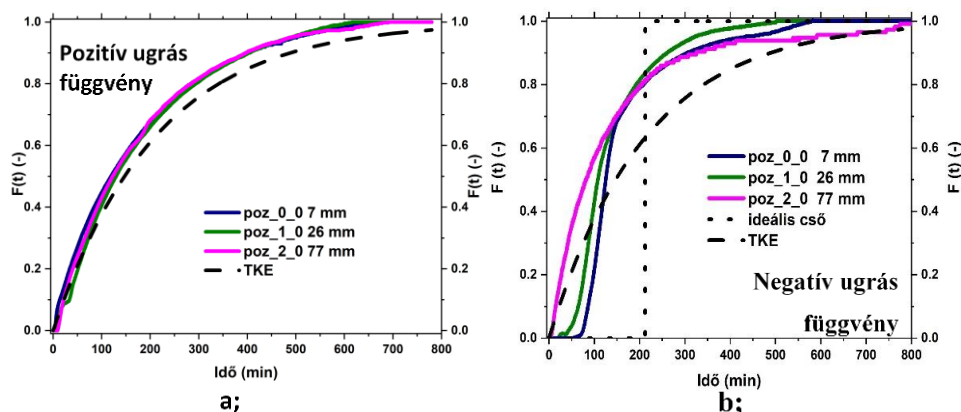
A szívócsonk hatásainak vizsgálatával (26. ábra) azt a célt tűztem ki, hogy megvizsgáljam a szívócsonk vertikális pozíciójának befolyását a keverési időre.

##### 3.1.1 Tartózkodási idő vizsgálatok

Az átmenti függvények felvételének célja, hogy a kapott adatokból az eloszlásfüggvény és a sűrűség függvény segítségével tartózkodási idő várható értéket (1-45) tudjak számolni.

A kísérletsorozat összeállításakor azzal a feltételezéssel éltem, hogy a tartózkodási idő várható értékében némi változást tapasztalok a szívócsonk pozíciójának függvényében. A pozitív ugrás függvényre adott válasz függvényeket ábrázoló diagramon (34. ábra a;) láthatjuk, hogy az eloszlás függvények a kilépő csonk vertikális pozíciójától függetlenül közel együtt haladnak, exponenciálisnak tűnő trenddel. A 13 órás kísérleti idő alatt, mind a három esetben a kilépési csokon a várt,  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldatot mértem vissza (9. Melléklet a;). Az átmeneti függvényből számolt eloszlás függvényeket összehasonlítva a tökéletesen kevert üst (TKE) egységugrás függvényre adott válaszfüggvényével (1-50) látható, hogy az exponenciális jelleg igazolódik. A mérés kezdetén némi holtidő jelentkezik, azonban ez a teljes mérési időt tekintve elhanyagolható. Abban az esetben, mikor a csonk 7 mm-el a tartály feneké felett volt, a holt idő 2.5 min-nak, 26 mm-re fölötté 5.5 min-nak míg 77 mm-re a tartály feneké felett 9.0 min-nak adódott.

## Eredmények és kiértékelés



**34. ábra: Ugrás függvénnyel zavart rendszer eloszlás függvényei különböző elvételi csonk pozíciókban (TKE: tökéletesen kevert egység)  
a; pozitív ugrás függvény b; negatív ugrás függvény zavaró jel esetén**

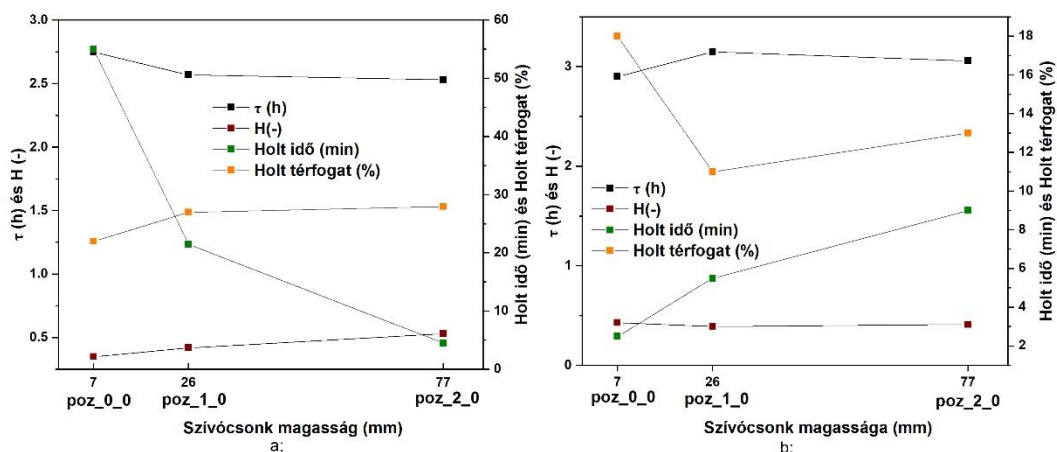
Negatív ugrás függvény alkalmazása során az eloszlás függvények (34. ábra b;) más képet mutatnak, mint pozitív ugrás függvény esetén. A mérések kezdetén hosszabb szakasz figyelhető meg, ahol koncentráció változás nem történt (9. Melléklet b;). Poz\_0\_0 esetén ez 55.0 min, poz\_1\_0 esetén 21.5 min, míg poz\_2\_0, mikor a kilépő csonk 77 mm-en volt a tartály fenekétől csak 4.5 min-nak adódott (35. ábra, 15. táblázat). A holtidő jelenléte alapvetően az ideális cső reaktor (14. ábra) válaszfüggvényére jellemző, azonban az eloszlás függvények a holtidő után exponenciális trendet mutatnak, ami viszont a tökéletesen kevert üst jellemzője. A holtidő szívócsonk pozícióval történő változása a tartályban lévő és a betáplált oldat közötti fajsúly különbségnek tulajdonítható.

Az eloszlás függvényekből momentumok módszerével számolt tartózkodási idő várható értéke (15. táblázat) minden esetben kevesebb, mint az átlagos tartózkodási idő (3.53 h) (2.5. fejezet).

Negatív ugrás függvényt (35. ábra a;, 15. táblázat) alkalmazva zavarójelként a tartózkodási idő várható értéke csökken a szívócsonk magasságának növelésével. Az átlagos tartózkodási idő és az eloszlás függvényből számolt hold-back értékek (1-41) a szívócsonk magasságának növelésével nőnek, azaz tartanak a teljes holt térfogattal jellemezhető folyadék térfogat felé. Ezt az eredményt bizonyítja a tartózkodási idő várható értéke és az ismert térfogatáram segítségével meghatározott holt térfogat (1-23) növekvő tendenciája. Ez a megfigyelés alátámasztja az eloszlás függvény alakjának változását a szívócsonk magasságának

## Eredmények és kiértékelés

növelésével. Minél magasabban van a szívócsonk a tartózkodási idő eloszlás függvénye annál inkább exponenciális lefutású és annál kisebb a konstans kezdeti szakasz. Ugyanakkor némileg cáfolja is, mivel a tökéletesen kevert üst hold-back értéke 0.37-el egyenlő, melyet a poz\_0\_0 jelű mérés hold back értéke közelít a legjobban, holott ennek a mérésnek az eloszlás függvénye közelíti leginkább az ideális csőre jellemző eloszlás függvényt.



**35. ábra: A szívócsonk pozíciójának hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra a; negatív ugrás függvény b; pozitív ugrás függvény zavaró jel esetén**

Pozitív ugrás függvénnyel végzett kísérleti adatokból számolt tartózkodási idő várható értéke (35. ábra b; 15. táblázat) szintén változik a szívócsonk pozíciójával. A legnagyobb értéket, 3.15 h-t 26 mm-es szívócsonk magasság esetén kaptam. A legkisebb tartózkodási idő várható értéket a poz\_0\_0 mérés során számoltam, mely 15 min-al kevesebb, mint a poz\_1\_0 mérése. A 77 mm-es csonk pozícióra számolt érték, mely 5 perccel kisebb, mint a 26 mm-re és 10 perccel nagyobb, mint a 7 mm-es csonk pozícióra számolt. Ezt a trendet, a hold-back érték is tükrözi. A hold-back értékek között, nincs olyan nagy különbség (max. 0.04), mint a  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldattal végzett kísérlet (min. 0.07) során. A holt térfogat esetén a poz\_0\_0 mérésre számolt (18 %) érték különbözik leginkább a többitől (11, 13 %). Érdekes, hogy híg betáplálás esetén a 7 mm csonk pozícióval kaptam a legnagyobb holt térfogatot (18 %), míg tömény betáplálás esetén arra kaptam a legkisebbet (22 %).  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  oldat betáplálásával minden esetben kisebb holt térfogatokat számoltam, mint a híg oldattal végzett kísérletek esetén.

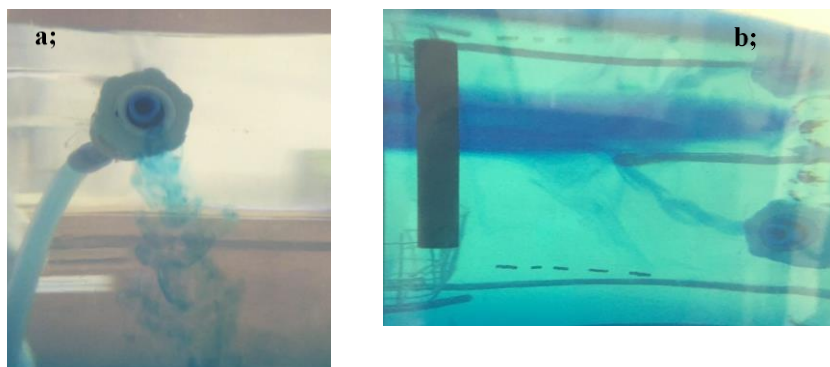
## Eredmények és kiértékelés

**15. táblázat: A szívócsenk pozíciójának hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra**

Betáplált oldat	1002.2 kg m <sup>-3</sup>			1013.6 kg m <sup>-3</sup>		
	poz_0_0	poz_1_0	poz_2_0	poz_0_0	poz_1_0	poz_2_0
Mérés jele						
$\tau$ (h)	2.75	2.57	2.53	2.90	3.15	3.06
H (-)	0.35	0.42	0.53	0.43	0.39	0.41
Holt idő (min)	55	21.5	4.5	2.50	5.5	9
Holt térfogat (%)	22	27	28	18	11	13

A kísérletek során készített fotókon (36. ábra) látható, hogy abban az esetben, mikor a töményebb, 1013.6 kg m<sup>-3</sup> oldatot, tápláltam be (36. ábra a;) a sűrű oldat a híg, 1002.2 kg m<sup>-3</sup>, oldattömeg alá merül. A sűrű oldat alulról szorítja ki a híg folyadékot, annak köszönhetően, hogy a tömény oldat a tartály alja felé törekszik, így vélhetően a teljes folyadéktömegben történik keveredés. Ez magyarázatot adhat, arra, hogy még a 77 mm-es csenk pozíció esetén is csak 9.0 perc a holtidő a CH2-es mintavételezési ponton (15. táblázat). Abban az esetben, mikor a híg oldatot tápláltam a töményebb oldatba (36. ábra b;) látható, hogy a betáplált oldat a tömény oldatra rétegződik. Ez magyarázza azt, hogy a 77 mm-es csenk beállítás esetén a holtidő csak 4.5 min, míg poz\_0\_0 esetén ez 55 perc (15. táblázat).

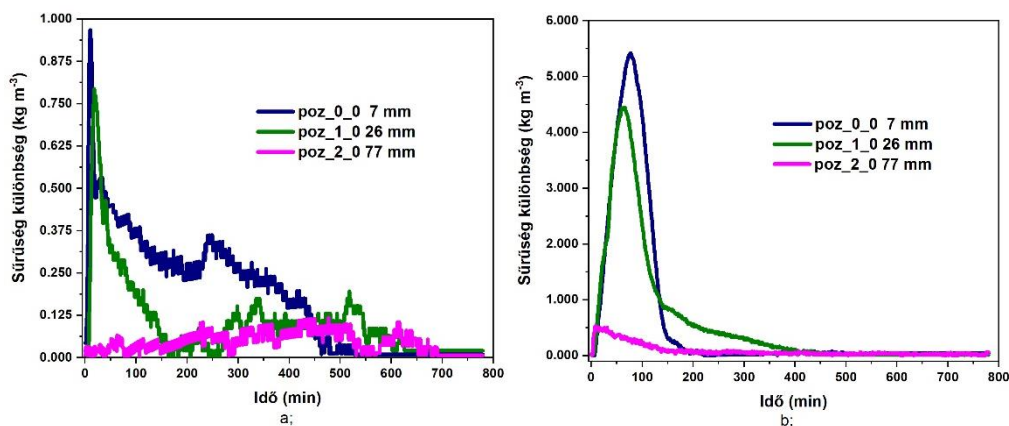
## Eredmények és kiértékelés



**36. ábra: Fotó a betáplált oldat áramlási útjáról a; 1013.6 kg m<sup>-3</sup> betáplált oldat 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségűbe b; 1002.2 kg m<sup>-3</sup> betáplált oldat 1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségűbe**

A CH1-es és CH2-es mintavételezési ponton számolt sűrűség különbség eredményeit bemutató ábrán láthatjuk (37. ábra), hogy a mérés elején van nagyobb különbség a két mintavételezési pont között. Pozitív ugrás függvény zavaró jel esetén (37. ábra a); a különbség maximálisan 0.938 kg m<sup>-3</sup>. A sűrűség különbség és a kilépő csomak pozíciója között összefüggés figyelhető meg, amiből az következik, hogy az eloszlásfüggvények tökéletesen kevert üst jellege ellenére, a keveredés nem azonos mértékben zajlik a tartály 2 mérési pontján. A negatív zavaró jel esetén (37. ábra b); a két mérési pont között jelentősebb a koncentráció különbség, 5.500 kg m<sup>-3</sup> maximálisan, továbbá e mérés esetén lassabb a koncentráció különbség lecsengése. A poz\_2\_0 mérés esetén a maximális koncentráció különbség 0.500 kg m<sup>-3</sup>, ami azt bizonyítja, hogy a közel azonos magasságban lévő mintavételezési pontokban a koncentráció közel azonosan változik. Ezt az észrevételt bizonyítja az is, hogy a poz\_0\_0 és a poz\_1\_0 mérések esetén az eltérés jelentősebb (5.500 és 4.500 kg m<sup>-3</sup>), de a poz\_0\_0 (5.500 kg m<sup>-3</sup>) esetén mért különbséghez képest a poz\_1\_0 (4.500 kg m<sup>-3</sup>) csökken.

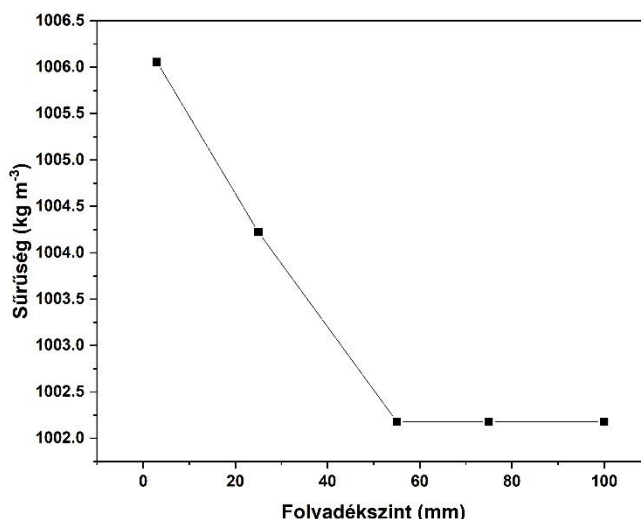
## Eredmények és kiértékelés



**37. ábra: A CH1-es és CH2-es mérési ponton mért sűrűség különbsége a; pozitív ugrás függvény esetén b; negatív ugrás függvény esetén**

A mérések befejeztével minden esetben összekevertem manuálisan a tartály tartalmát. Pozitív ugrás függvénnyel végzett kísérletek egyikénél sem tapasztaltam koncentrációváltozást. Negatív ugrás függvény esetén a poz\_0\_0-jelű mérésnél nem, azonban a poz\_1\_0 esetén 1003.3 kg m<sup>-3</sup> sűrűséget kaptam, ami 1.1 kg m<sup>-3</sup>-el nagyobb érték, mint amit utoljára a kilépési csomak mellett mértem (1002.2 kg m<sup>-3</sup>). Ezért a poz\_2\_0 mérés végén mintákat vettem a folyadékból 3, 25, 55, 75 és 100 mm magasságból (7. táblázat, 38. ábra). Az eredményeken az látszik, hogy 55 mm-es folyadék magasság fölött a mért minta sűrűsége megegyezik a várt 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűséggel, a tartály feneké felé haladva azonban a koncentráció nő. A tartály aljáról vett minta sűrűsége 1006.1 kg m<sup>-3</sup>, mely 3.6 kg m<sup>-3</sup>-el nagyobb, mint az elvárt sűrűség. A mérési eredmények azt mutatják, hogy 13 órás keverési idő eltelte után is maradnak a rendszerben inhomogén folyadék elemek. A kilépési csomakon mért sűrűség, koncentráció bizonyítottan nem reprezentálja a teljes folyadék térfogatra jellemző értéket.

## Eredmények és kiértékelés



**38. ábra: poz\_2\_0 mérés végén vett minták sűrűsége negatív egység ugrás függvény betáplálás után**

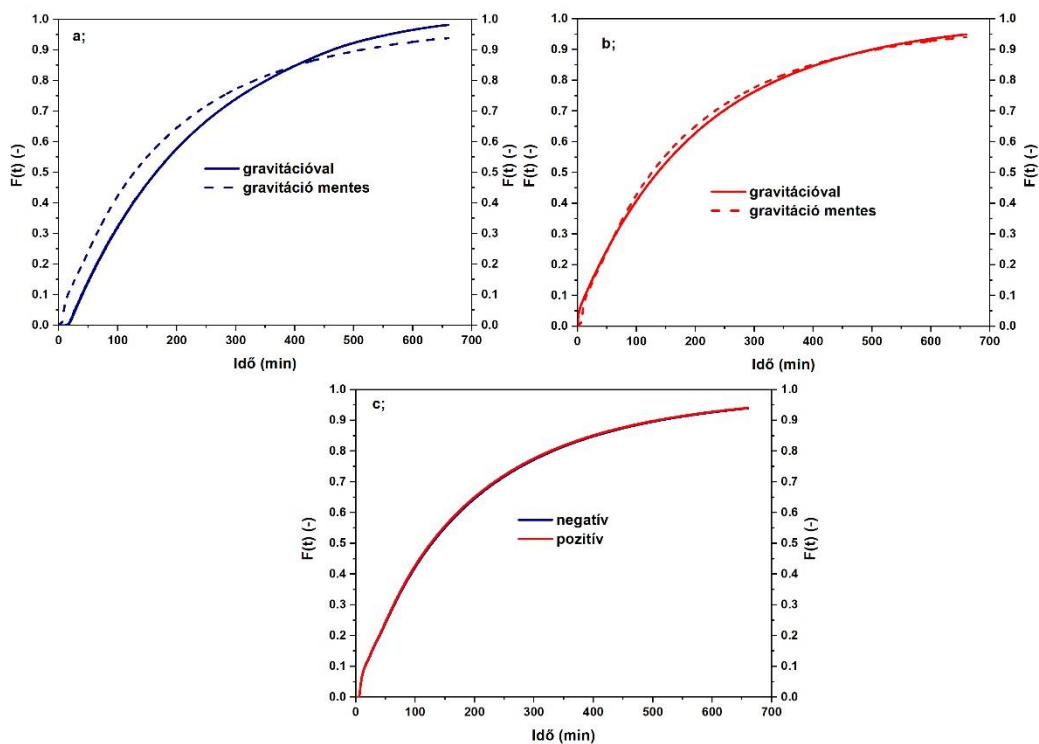
A laboratóriumi munka során kapott eredmények alapján a jelzőanyag fajsúlyának jelentős szerepe van tartózkodási idő eloszlás függvényre. CFD szimulációval vizsgáltam azt, hogy a tartózkodási idő várható értékére és a tartózkodási idő eloszlás függvényre (39. ábra) milyen hatása van annak, ha nincs fajsúly különbség a rendszerben, azaz nincs gravitáció. Szeretném kiemelni, hogy a vizsgálat célja nem a laboratóriumi eredmények leképezése volt szimulátorban.

Negatív egységugrás függvényt használva zavaró jelként (39. ábra a;) azt az eredményt kaptam, hogy a gravitáció megléte lassítja a kilépési csomakon a kívánt,  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűség elérését. Gravitációmentes esetben függetlenül attól, hogy milyen sűrűségű oldatot táplálok be, ugyanolyan eloszlás függvényt kell hogy kapjak továbbá, ugyanakkora kell hogy legyen a tartózkodási idő várható értéke is. A gravitációmentes esetek összehasonlításánál (39. ábra c;) látszik, hogy az eloszlás függvények fedik egymást, továbbá a tartózkodási idő várható értéke (16. táblázat) is megegyezik egymással (2.44 h). Mind negatív (3.16 h) mind pozitív (2.71 h) betáplálás esetén gravitációs környezetben nagyobb értéket kaptam a tartózkodási idő várható értékére, mint gravitációmentes (3.32 h) esetben. Azaz gravitációmentes esetben kisebb a rendszerben a holt térfogat, hiszen jobban közelíti a tartózkodási idő várható értékét.

## Eredmények és kiértékelés

16. táblázat: CFD vizsgálat során számolt tartózkodási idő várható értékek

		Tartózkodási idő várható értéke (h)
negatív egységugrás függvény	gravitációval	3.16
	gravitációmentes	2.44
pozitív egységugrás függvény	gravitációval	2.71
	gravitációmentes	2.44



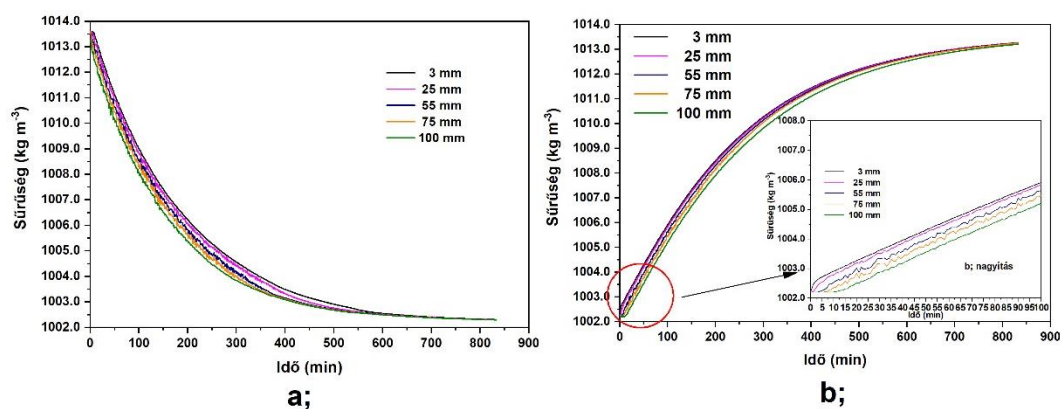
39. ábra: CFD vizsgálat során kapott eloszlás függvények a; negatív egység ugrás zavaró függvény b; pozitív egység ugrás zavaró függvény c; gravitációmentes eset

A megalkotott szimulátor segítségével vizsgálatot végeztem, hogy bebizonyítsam, hogy a betáplált oldat fajsúlyától függően a kívánt oldat sűrűség a tartály alján vagy tetején alakul ki elsőként. A kialakuló sűrűséget a tartály középpontjában vizsgáltam, különböző, 3, 25, 55, 75 és 100 mm magasságban (40. ábra).



## Eredmények és kiértékelés

A sűrűség görbéket ábrázoló diagramon látható, hogy a pozitív ugrás függvény betáplálás (40. ábra b;) esetén a tartály alján (0;3;0) rögzített sűrűség az első pillanattól kezdve folyamatosan, exponenciális trenddel nőni kezd, míg a 100 mm magasságban felvett adatokban a 11-dik perctől láthatunk változást. Ez alapján elmondható, hogy a sűrűbb anyag a tartály aljára vándorol és magasabb folyadékrétegekben csak később eredményez változást. Negatív egységugrás zavarás (40. ábra b;) alkalmazásakor fordított esettel állunk szemben. A tartály tetején (0;100;0) rögzített sűrűség azonnal változik, míg a tartály alján csak a 9-dik perctől történik változás a sűrűségben. Ez a megfigyelés azt mutatja, hogy a betáplált oldat rétegről-rétegre változtatja meg a teljes folyadék térfogat sűrűségét.



**40. ábra: Különböző folyadékmagasságban rögzített sűrűség az idő függvényében a; negatív ugrás függvény betáplálás esetén b; pozitív ugrás függvény betáplálás esetén**

### 3.1.2 Recirkulációs vizsgálatok

A recirkulációs vizsgálatok célja (2.3 fejezet) az volt, hogy a keverési művelet tanulmányozzam egy olyan szélsőséges esetből kiindulva, mikor a tartály tartalma teljesen rétegződött (41. ábra) és alul van a nagyobb koncentrációjú réteg.

## Eredmények és kiértékelés



**41. ábra: Rétegzett rendszer kialakítása**

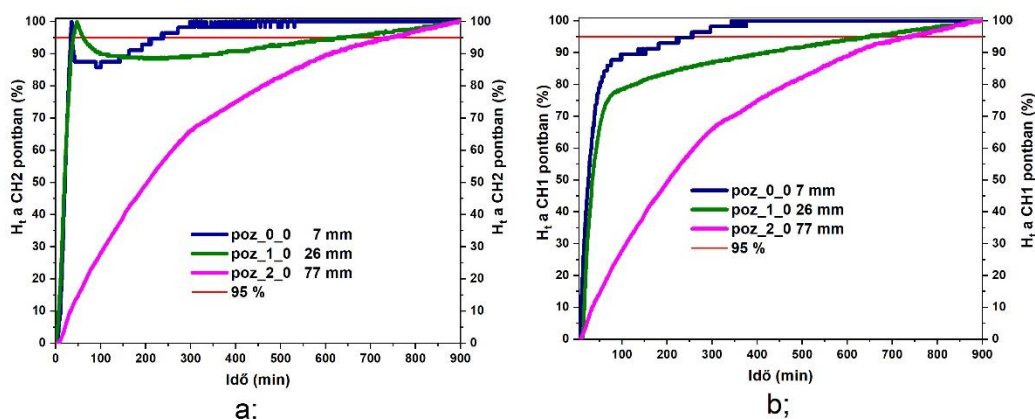
A vezetőképesség-mérő elektródok a korábban bemutatott (2.5 fejezet) helyeken voltak pozicionálva. A sűrűség adatokat (10. Melléklet) homogenitás függvényben ( $H_t$ ) (3-1) értékeltem ki.  $H_t$  azt jelenti, hogy az adott pontban a koncentráció ( $c_t$ ) milyen mértékben közelíti meg a várható átlagos koncentrációt ( $c_{\text{átl}}$ ),  $\Delta c$  pedig a kezdeti és az elvárt végkoncentráció különbsége.

$$H_t(\%) = 100 - \left( \frac{|c_t - c_{\text{átl}}|}{\Delta c} \right) * 100 \quad 3-1$$

A kilépési csomak mellett (42. ábra a;) rögzített vezetőképesség adatokból számított homogenitás görbék közül a tartály fenekéhez közelebbi szívócsomak pozíciók esetén, 7 és 26 mm, a kezdeti éles növekedés után egy csökkenő, völgy-szerű rész mutatkozik. Ez a szakasz annak köszönhető, hogy kezdetben a szívócsomakon az  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű rétegből történik az elvétel, mely a híg  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  rétegbe kerül betáplálásra. A tömény folyadékelemek miközben a tartály alja felé vándorolnak, magukkal ragadnak a híg rétegből is oldatot, mely egy gyors híguláshoz vezet a kilépési csomakon. A homogenitás eredményeket összehasonlítottam a 95 % homogenitás eléréséig szükséges időtartam szerint. A kilépési csomak melletti és a tartály közepén lévő mérési ponton kapott homogenitás (42. ábra) alapján megfigyelhető összefüggés a szívócsomak pozíciója és a 95 % homogenitás eléréséhez szükséges idő között. Látható (42. ábra a;), hogy 7 mm-es szívócsomak pozíció esetén lépjük át leghamarabb a 95 %-os küszöb értéket, míg legkésőbb a 77 mm-es pozíció esetén. A poz\_0\_0 mérés esetén a 33.5 min-ban éri

## Eredmények és kiértékelés

el a 95 %-os homogenitást, majd további növekedés után csökkenni kezd, 85 %-ig és a 236-dik percben lépi át újra a 95 %-os homogenitást. A 26 mm-es csomkpozíció esetén a 40-dik percben lépi át a 95 %-os homogenitási értéket, majd egy hosszabb hígabb szakaszt követően a 630. percben lépi át újra a 95 %-os homogenitási értéket. A poz\_2\_0, 77 mm-es csomk pozíció esetén exponenciális jellegű homogenitási görbét kapunk a szívó csomk mellett és a 751-dik percben lépjük át a 95 %-os homogenitási köszöböt. A CH1-es mérési (42. ábra b;) ponton felvett homogenitási görbéken is érvényesül a szívócsomk pozíciójának a hatása. Ebben az esetben is a 7 és 26 mm csomkpozíciók görbéje hasonlít jobban egymásra.

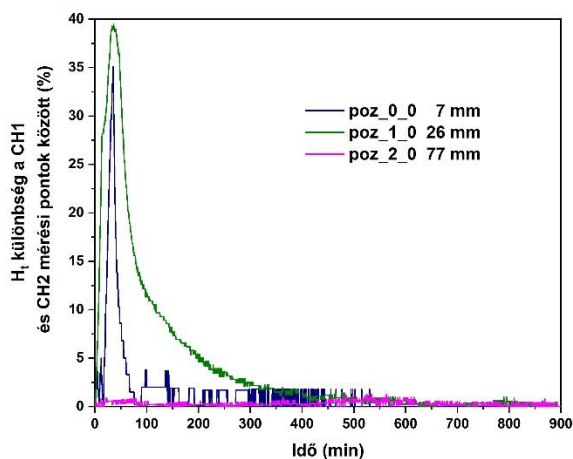


**42. ábra: Homogenitás értékek recirkulációs mérés esetén a; CH2-es mérési ponton b; CH1-es mérési ponton**

A CH1 és CH2 mérési pontokon számolt homogenitás értékek különbségéből (43. ábra) azt láthatjuk, hogy a két mérési pont között a 7 mm és 26 mm-es csomk pozíció esetén az első 100 percben van nagy különbség. A CH2-es mérési ponton nagyobb a homogenitási érték, mint a CH1-esen (42. ábra). A poz\_2\_0 esetén viszont az első pillanattól kezdve nagyon kicsi ( $< 1\%$ ) a két homogenitás közötti különbség. Ez annak köszönhető, hogy a két mérési pont közel egy magasságban van, 60 mm-en (CH2) és 67 mm-en (CH1). A poz\_1\_0 és poz\_0\_0 estén gondolhatnánk arra, hogy a rendszerben a jelentős horizontális eloszlás is eredményezhette a nagy eltérést (40 %) a két pont között, azonban a poz\_2\_0 esetén kapott eredmény inkább arra enged következtetni minket, hogy a koncentrációban inkább vertikális eloszlás érvényesül.

## Eredmények és kiértékelés

A mérések befejeztével a tartály tartalmát összekevertem és a poz\_0\_0 és poz\_1\_0 mérések esetén nem tapasztaltam koncentrációváltozást egyik mérési ponton sem, azonban a poz\_2\_0 esetén az új sűrűség  $1009.0 \text{ kg m}^{-3}$  volt, mely a várt sűrűsénél ( $1007.9 \text{ kg m}^{-3}$ ) jóval nagyobb és az utoljára ( $1008.3 \text{ kg m}^{-3}$ ) CH2-es mérési ponton mérthez képest is eltér.



**43. ábra: CH1 és CH2 mérési pontokon számolt homogenitás értékek különbsége az idő függvényében**

### 3.2 Nyomócsonk hatásainak vizsgálata

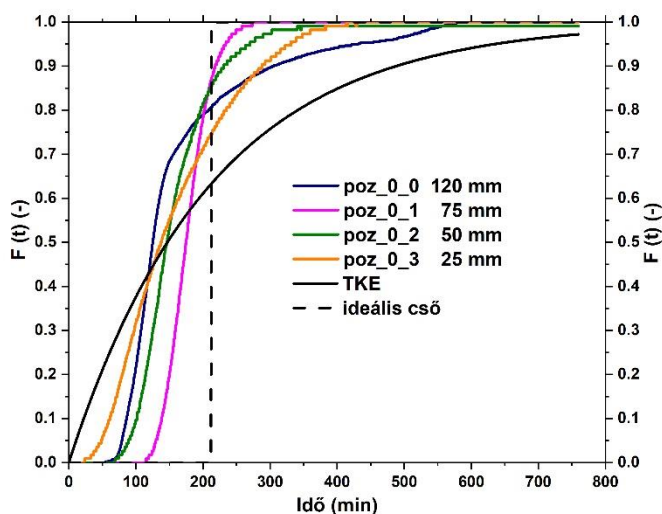
A nyomócsonk pozíció keverésre gyakorolt hatásainak tanulmányozása céljából 4 pozíciót vizsgáltam (27. ábra), a szívócsonk mindig 7 mm-en volt. A négy csonk pozíció közül egy a folyadékszint felett (poz\_0\_0), három a folyadékszint alatt volt kialakítva. A poz\_0\_0 120 mm, poz\_0\_1 75 mm, poz\_0\_2 50 mm míg a poz\_0\_3 25 mm-re volt a tartály fenekétől. A CH1-es és CH2-es mérési pontok minden mérés esetén ugyanabban a pozícióban helyezkedtek el (5. táblázat). A szívócsonk hatásainak vizsgálatával megegyező módon végeztem a nyomócsonk pozíciók hatásainak feltérképezését is.

#### 3.2.1 Tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok

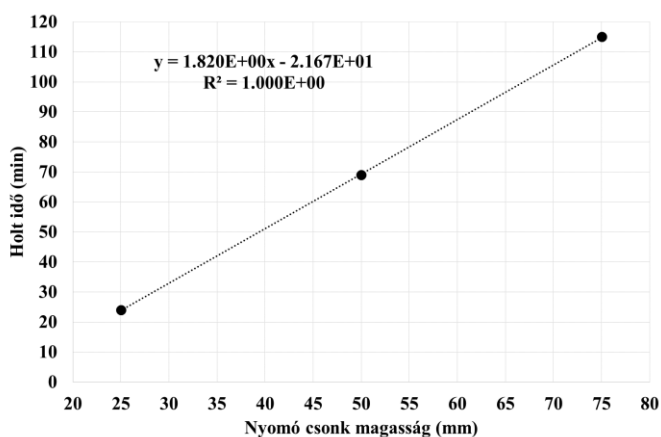
Negatív ugrás függvény zavaró jel esetén (44. ábra) alakra hasonló eloszlás függvényeket kapunk, mint a szívócsonk pozíciók hatásainak vizsgálatokor (34. ábra b;). Kezdetben betáplálási csonk pozíciótól függetlenül konstans szakasszal találkozunk. Amennyiben jobban megfigyeljük az eloszlásfüggvényeket a

## Eredmények és kiértékelés

folyadékszint (105 mm) fölötti és alatti betáplálás között jelentős különbség van. A konstans szakasz után a folyadék szint feletti csonk esetén exponenciálisabb jellegű görbét kapunk, mint a folyadékszint alattiak esetén. A 120 mm-es csonk pozíció esetén kisebb, 55 perces holt idő mutatkozik, míg 75 mm-en betáplált oldat esetén ez 115 perc (17. táblázat). Amennyiben a folyadék szint alatti pozíciókat vetjük össze, akkor a holt időben összefüggést láthatunk, még hozzá lineáris összefüggést a tartály aljától mért távolsággal (45. ábra).



**44. ábra: Negatív ugrás függvényvel zavart rendszer eloszlás függvényei különböző betáplálási csonk pozíciókban (TKE: tökéletesen kevert egység)**



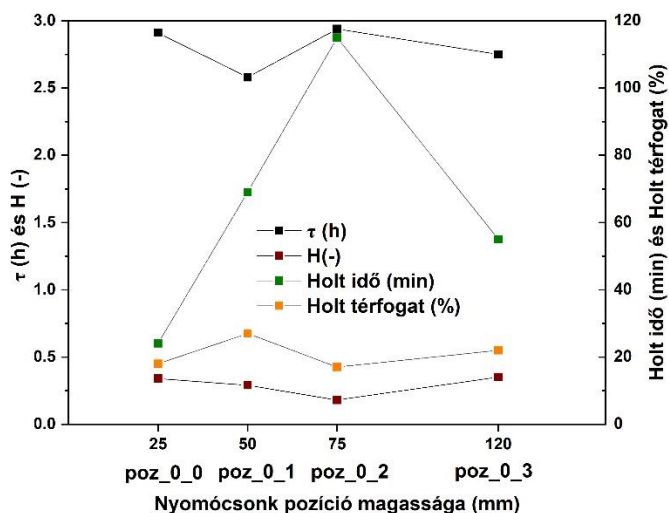
**45. ábra: Folyadékszint alatti nyomócsonk pozíciók és a holtidő közötti lineáris összefüggés**

## Eredmények és kiértékelés

A tartózkodási idő várható értékénél (17. táblázat) is látható a nyomócsonek hatása. Folyadékszint feletti betáplálás esetén kisebb, 2.75 h, értéket kaptam, mint folyadékszint alatti betáplálás esetén, 2.94 min. A további csonek pozícióknál is tapasztalható változás a tartózkodási idő várható értékében, azonban trend nem figyelhető meg. A hold-back érték és a holt térfogat nem mutat lineáris összefüggést, mint a szívócsonek pozíció hatásainak vizsgálatakor (15. táblázat).

**17. táblázat: A nyomócsonek pozíciójának hatása a tartózkodási idő várhatóértékre, hold-back értékre és holt térfogatra 1002.2 kg m<sup>-3</sup> betáplált oldat esetén**

Mérés jele	poz_0_0	poz_0_1	poz_0_2	poz_0_3
$\tau$ (h)	2.75	2.94	2.58	2.91
H (-)	0.35	0.18	0.29	0.34
Holtidő (min)	55	115	69	24
Holt térfogat (%)	22	17	27	18



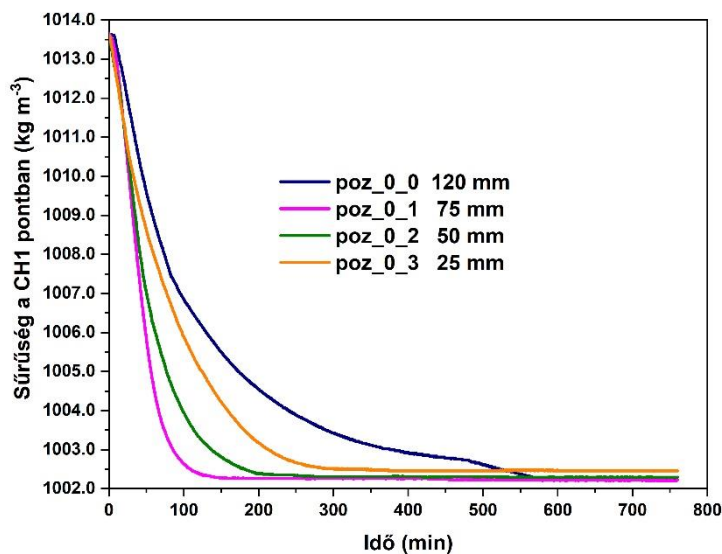
**46. ábra: Nyomócsonek pozíciójának hatása a tartózkodási idő várhatóértékre, hold-back értékre és holt térfogatra 1002.2 kg m<sup>-3</sup> betáplált oldat esetén**

## Eredmények és kiértékelés

A CH2-es mérési ponton tapasztalt holt idő és nyomócsonk magasság közti összefüggéshez (45. ábra) hasonlóan lehet megfigyelni a CH1-es mérési pontban rögzített sűrűség adatokban. A várt  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűség érték eléréséhez szükséges időtartam a poz\_0\_0 esetén volt a leghosszabb (550 min), míg a legrövidebb (150 min) a poz\_0\_1 esetén. Ez elsőre némi zavart okoz, azonban ha figyelembe vesszük az eddigi észrevételeket, hogy a koncentráció változás az vélhetően vertikálisan nagy, továbbá elfogadjuk azt, hogy a betáplált,  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat a felhajtó erőnek köszönhetően felfelé tart, akkor máris magyarázatot találunk a jelenségre.

A betáplálási csonkon a  $14.6 \text{ ml min}^{-1}$  térfogatárammal  $2.97 \text{ cm}$  magas folyadékréteget juttatunk be egy óra alatt a rendszerbe, de ugyan ebben a tempóban a szívócsonkon keresztül távozik a rendszerből. A  $75 \text{ mm}$ -en betáplált oldatnak a  $75 \text{ mm}$  és a  $105 \text{ mm}$  (folyadékszint) közötti folyadékoszlopot kell homogenizálnia, miközben a szívócsonknak köszönhetően ez a hígított folyadékréteg folyamatosan vándorol lefele és eléri a  $60 \text{ mm}$  magasságban lévő CH1-es elektródot. Az  $50 \text{ mm}$ -es nyomócsonkon betáplált oldatnak az  $55 \text{ mm}$  magas folyadékréteget ( $105\text{-}50 \text{ mm}$ ) kell homogenizálnia és így tovább. Felmerül a kérdés, hogy akkor miért nem a folyadékszint fölötti pozíció az, ami esetén a legkorábban elérjük a kívánt sűrűséget. A folyadékfelszín felett betáplált folyadék a folyadék felszínén terül szét, mely következtében nem keveredik a tömény folyadékkal. A koncentrációváltozás akkor jelenik meg a CH1-es mérési ponton, mikor a szívócsonkon keresztül már távozik annyi oldat, hogy a híg réteg legyen a CH1-es mintavételezési csonk magasságában.

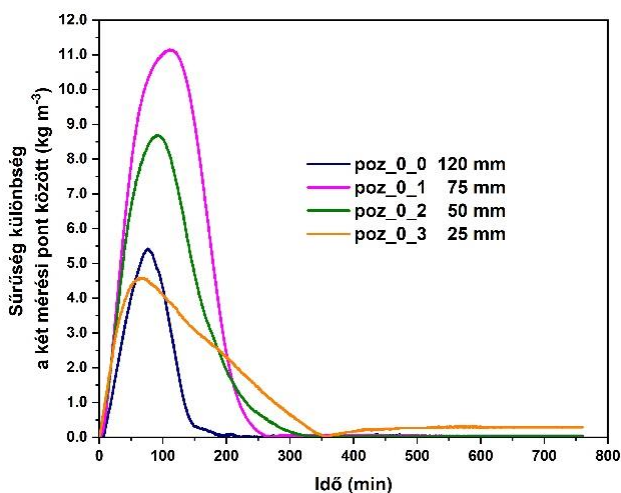
## Eredmények és kiértékelés



**47. ábra: Negatív ugrás függvény betáplálással rögzített sűrűség adatok a CH1-es mintavételezési ponton**

A mérések utáni mintavétel alapján a folyadékszint feletti betáplálás kivételével némi inhomogenitás maradt a rendszerben. A tartály felső kétharmadában a várt  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűséget mértem vissza, azonban 25 mm és az alatt  $1004.0$  és  $1006.0 \text{ kg m}^{-3}$  értékeket kaptam. A tartály összekeverése után a poz\_0\_0 esetén nem tapasztaltam sűrűség változást, míg a folyadékszint alatti pozíciók esetén átlagosan  $1003.0 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűséget kaptam.

A rendszerben elért homogenitást alátámasztja a két mérési pont közötti alacsony sűrűség különbség ( $0.3 \text{ kg m}^{-3}$ ) a mérés végére (48. ábra).

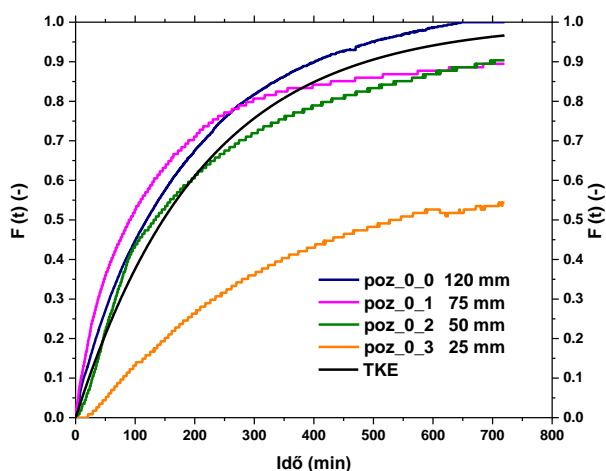


**48. ábra: Sűrűség különbség a két mérési pont között  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű betáplált oldat esetén**



## Eredmények és kiértékelés

A tömény,  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldattal végzett tartózkodási idő eloszlás vizsgálatoknál nehézségekbe ütköztem a korábbiakhoz képest. A sűrűség adatokból számolt eloszlás függvényeken (49. ábra) látszik, hogy a folyadékfelszín feletti betáplálás kivételével nem érte el, sőt bizonyos esetben meg sem közelítette az 1-et az eloszlás függvény. A számítások során a sűrűség függvény integrálja a poz\_0\_1 esetén is 10 %-os hibával terhelt, mellyel számított tartózkodási idő várható értéke 2.09 h. A poz\_0\_1 jelű méréshez hasonlóan a további, 50, 25 mm csonk pozíciók esetén számolt eredményeket a sűrűség függvény integráljának értéke miatt nem fogadom el és következtetést nem vonok le.



**49. ábra:  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálása után kapott eloszlás függvények a nyomócsonk pozíciójának függvényében**

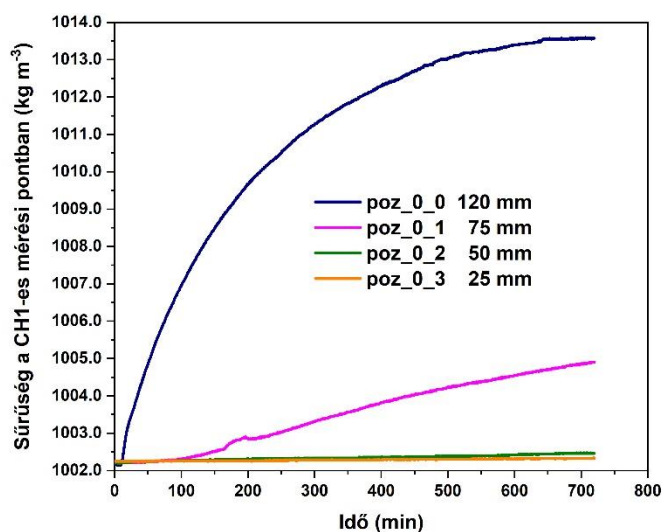
A hold-back értékeket azonban az eloszlás függvény adataiból számítom, így ezeket vettem figyelembe a kiértékelés során. A hold-back értékek (18. táblázat) trendje egyezik a tartózkodási idő várható értékének eloszlásfüggvényével. A folyadékszint alatti betáplálás esetén a hold-back érték a nyomócsonk magasságának csökkentésével csökken, azaz tart az ideális cső áramlás felé. Továbbá az eloszlás függvényeket tekintve minél alacsonyabban van a betáplálási csonk annál nagyobb az eltérés az exponenciális trendtől, illetve meg is jelenik a holtidő a vizsgálatok elején.

## Eredmények és kiértékelés

**18. táblázat: A nyomócsonk pozíciójának hatása a hold-back értékre és holtidőre 1013.6 kg m<sup>-3</sup> betáplált oldat esetén**

Mérés jele	poz_0_0	poz_0_1	poz_0_2	poz_0_3
H (-)	0.43	0.49	0.39	0.13
Holtidő (min)	2.50	0	4	21
$\int_0^t E(t)dt$	1.0258	0.9035	1.2719	0.7982

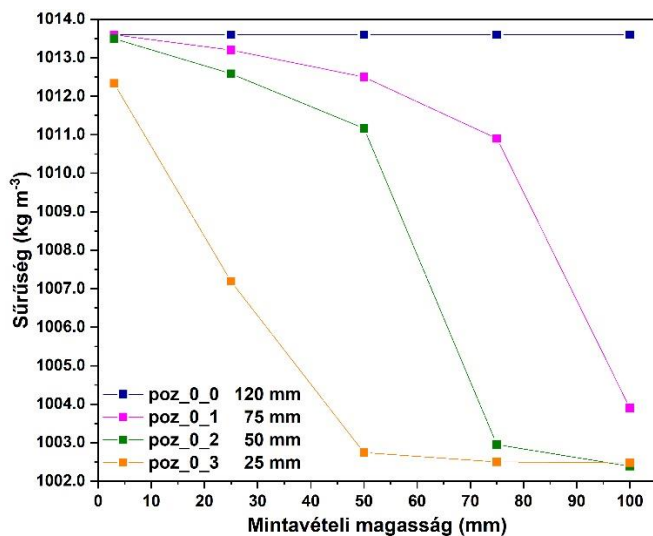
A CH1-es mintavételezési ponton (50. ábra) kapott sűrűség eredményeken látható, hogy a tartály egészére kiterjedő keverés nem valósult meg a vizsgált rendszerben azokban az esetekben, mikor a nyomócsonk folyadékszint alatt volt. 75 mm-es nyomócsonk pozíció vizsgálatakor némi sűrűség változást lehetett mérni, azonban 50 mm és 25 mm-es csonk pozíció esetén nem tapasztaltam sűrűség növekedést.



**50. ábra: Sűrűség eredmények a CH1-es mintavételezési ponton 1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálás esetén**

A vizsgálatok utáni mintavételi eredményekből (51. ábra) igazolódik, a korábbi észrevétel, mégpedig, hogy 1013.6 kg m<sup>-3</sup> oldat betáplálása esetén, amennyiben a nyomócsonk a folyadék felszín alatt van jelentős sűrűség különbségek maradnak a rendszerben. A nyomócsonk magassága fölötti folyadékrétegekben nem történik keveredés.

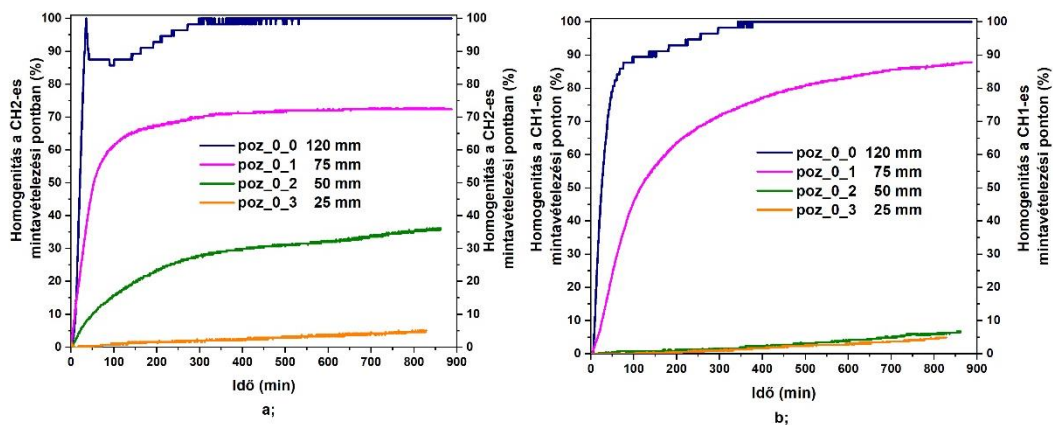
## Eredmények és kiértékelés



51. ábra: Mérések utáni mintavételek eredményei  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű betáplált oldat esetén

### 3.2.2 Recirkulációs vizsgálatok

Az előzőekben bemutatott módszerrel a nyomócsenk pozíciójának hatását a keverésre feltérképeztem recirkulációs (2.3. fejezet) rendszerben is. A mintavételezési pontokon kapott sűrűség (11. Melléklet) adatokat homogenitás függvények (3-1) segítségével értékeltem ki (52. ábra).



52. ábra: Homogenitás a CH2-es (a;) és CH1-es (b;) mintavételezési pontokon recirkulációs vizsgálat során

Érdekes, hogy míg a szívócsenk pozíció (42. ábra) vizsgálatánál a recirkulációs eredmények esetén rövidebb idő alatt, nagyobb homogenitási fokot értem el, mint a tartózkodási idő eloszlás vizsgálatoknál, addig a nyomócsenk pozíció változtatásánál rosszabb eredményeket kaptam. Látható, hogy a 14 órás kísérleti

## Eredmények és kiértékelés

idő alatt a poz\_0\_0 kivételével meg sem közelítette a homogenitás a 100 %-ot. A sűrűség eredmények (11. Melléklet) alapján elmondható, hogy a rendszerben a keveredés csak a szívó és nyomócsonk közötti folyadéktérfogatban történik. A fajsúlykülönbségből fakadó szabad konvekciós transzport mechanizmus a meghatározó, nem a szivattyú által generált kényszer konvekció a vizsgált rendszerben.

### 3.3 Kombinált csonk pozíciók

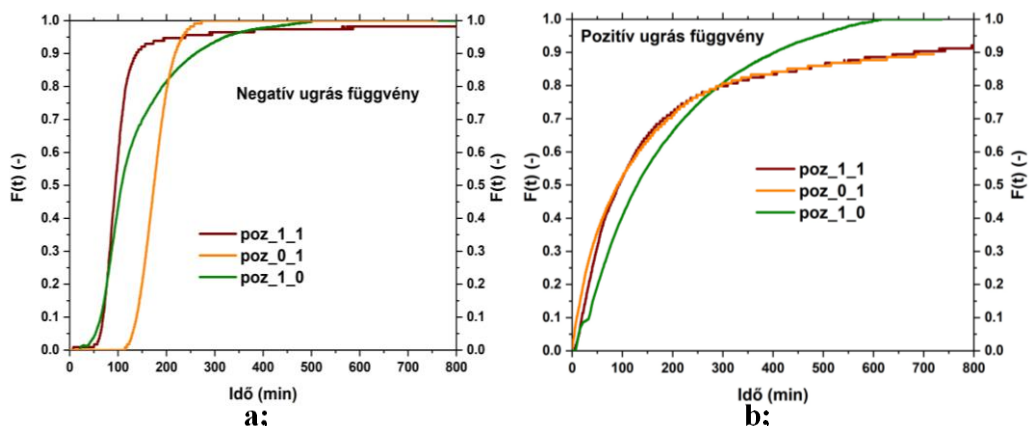
A kombinált csonk pozíciók kiértékelését úgy végeztem, hogy a nyomócsonk (3.1. fejezet, poz\_1\_0, poz\_2\_0) és szívócsonk (3.2. fejezet, poz\_0\_1, poz\_0\_3) keverésre gyakorolt hatásainak feltérképezésekor alkalmazott csonk pozíciók eredményeihez hasonlítottam az itt kapottakat. Vizsgálva a kombinált csonk pozíció hatását, meghatároztam, hogy a szívó vagy a nyomó csonk pozíciónak van e nagyobb hatása a keverésre.

#### 3.3.1 poz\_1\_1 csonk kombináció

Poz\_1\_1 csonk kombináció esetén a szívócsonk 26 mm, míg a nyomócsonk 75 mm magasságban volt pozícionálva.

Negatív egységugrás zavaró függvény esetén kapott eloszlás függvény (53. ábra a;) konstans szakasszal indul, azonban utána kevésbé meredek a növekedés, mint a poz\_0\_1 vagy poz\_1\_0 mérések esetén. A kezdeti stagnáló szakasz rövidebb, 8 min, mint a másik kettő pozíciónál (19. táblázat). A tartózkodási idő várható értéke a poz\_1\_1 kísérletben kapott eredményekkel számítható volt, melyre 2.44 h-t kaptam. A tartózkodási idő várható értéke ebben az esetben volt a legkisebb, míg a poz\_1\_0 estén 2.57 h és a legnagyobb értéket a poz\_0\_1 jelű mérésnél kaptam (2.94 h). Minél nagyobb a tartózkodási idő várható értéke, annál kisebb a holt térfogat a rendszerben, ezt a számított holt térfogat eredmények is bizonyítják (19. táblázat). A poz\_1\_1 jelű mérés során 31 % a holt térfogat. Ezt a megállapítást a hold-back érték növekedése is alátámasztja, hisz amennyiben H értéke egyenlő 1-el, akkor teljes holt térfogatról beszélünk.

## Eredmények és kiértékelés



**53. ábra: Egységugrás függvényre adott eloszlásfüggvények a; negatív ugrás függvény b; pozitív ugrás függvény esetén poz\_1\_1 csonk pozíció vizsgálatokor**

Pozitív ugrás függvény esetén a nyomócsonk pozíció vizsgálatánál tapasztalt nehézségbe ütköztem a számítások elvégzése során. Elsőre is látszik, hogy az eloszlás függvény (53. ábra b;) a poz\_0\_1 jelű mérésnél kapotthoz hasonlít. A poz\_1\_1 mérés esetén is nagy a hiba a sűrűség függvény integráljában (~ 7 %), így a tartózkodási idő várható értékét és a holt térfogatot nem számítottam (19. táblázat). Ez alapján a pozitív ugrás függvény alkalmazásakor a nyomócsonk pozíciójának javító hatása van a keverésre.

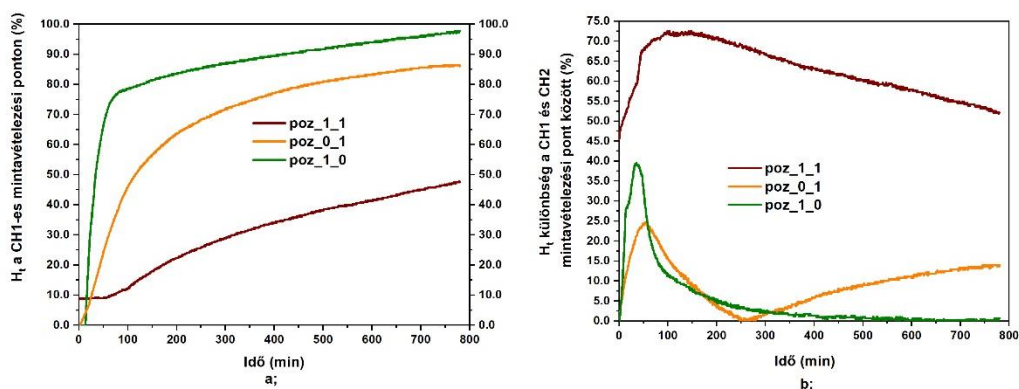
**19. táblázat: poz\_1\_1 kombinált csonk pozíciók hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra (neg.=negatív egységugrás függvény, poz.= pozitív egységugrás függvény)**

Mérés jele	poz_1_1		poz_0_1		poz_1_0	
	neg.	poz.	neg.	poz.	neg.	poz.
Egységugrás függvény						
Tartózkodási idő várható értéke (h)	2.44	-	2.94	-	2.57	3.15
H (-)	0.52	0.48	0.18	0.49	0.42	0.39
Holtidő (min)	8	4.5	115	0	21.5	5.5
Holt térfogat (%)	31	-	17	-	27	11

Recirkulációs vizsgálat során a pozitív ugrás függvénnyel végzett kísérlet alapján romlásra számítottam a homogenításban. A kiértékeléshez a CH1-es

## Eredmények és kiértékelés

mintavételezési ponton mért adatokat használtam, hiszen ez az elektród minden méréskor ugyanabban a pozícióban volt (2.5. fejezet). A homogenitás eredményeken (54. ábra a;) látszik, hogy a kombinált csomkpozíció alkalmazása a keverés szempontjából jelentős romláshoz vezetett. A poz\_0\_1 méréshez képest átlagosan 40 %-al kisebb a homogenitás függvény értéke adott időpillanatban, a poz\_1\_0-hoz képest pedig 50 %-al. A CH1 és CH2 mintavételezési helyek közötti homogenitás különbségen (54. ábra b;) is látszik, hogy a kombinált nyomócsonk alkalmazása a keverés szempontjából jelentős romláshoz vezet. Láthatjuk, hogy a poz\_1\_1 mérésnél a legkisebb homogenitás különbség (46 %) a két mérési pont között is nagyobb, mint a legnagyobb különbség (40 %) a poz\_1\_0-jelű csomk pozíció esetén.



**54. ábra: a; Homogenitás a CH1-es mintavételezési ponton b;  
Homogenitás különbség a CH1 és CH2 mintavételezési pontok között  
poz\_1\_1 csomk pozíció vizsgálatakor**

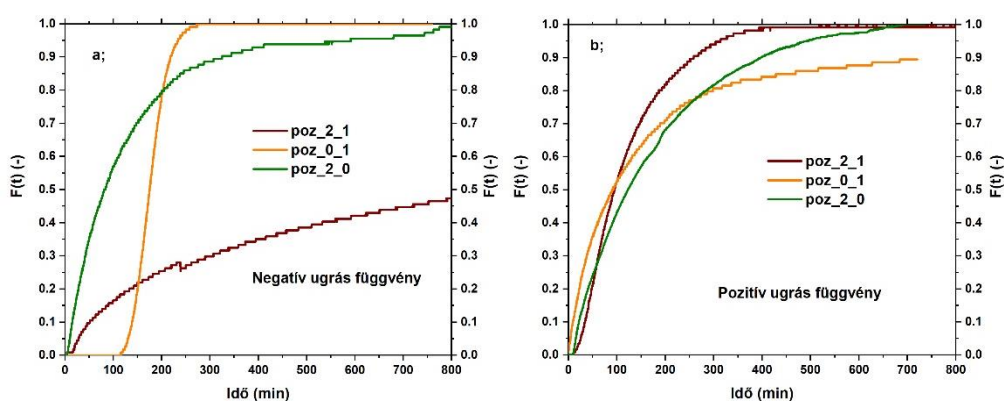
### 3.3.2 poz\_2\_1 csomk kombináció

Poz\_2\_1 kombinált csomkpozíció alkalmazásakor a nyomócsonk 75 mm-en volt, míg a szívó csomk 77 mm-en.

A negatív egységugrás függvényre adott eloszlás függvényen jelentős romlást tapasztaltam kombinált csomkpozícióval végzett kísérlet eredményéül (55. ábra a;). A mérés végeztével a poz\_2\_1 csomk pozíció válasz függvénye épphogy eléri a 0.5 értéket. Ennek az lehet az oka, hogy a betáplált híg oldat a felhajtó erő következtében a folyadékfelszín fele tart, eközben nyilván keveredik a tömény oldattal. Mivel a betápláló és elvételi csomk közel egy magasságban (75, 77 mm) van illetve, hogy a híg oldat felfele törekszik, csak a folyadékfelszín és a csomkok

## Eredmények és kiértékelés

között folyadékoszlop keveredik. A korábban pozitív egységugrás betáplálásnál tapasztalt tartózkodási idő várhatóérték számítási nehézségeivel (3.3.1. fejezet) most híg oldat bevezetésénél szembesültem. A sűrűség függvény integrálja (0.4825) messze a számítási hibahatáron túl van. Azonban a hold-back értéket és a holt időt ez esetben is meg tudtam állapítani. A hold-back érték esetén, 0.16, inkább a nyomócsonk hatása dominál, mivel a poz\_0\_1 estén a hold-back 0.18 a poz\_2\_0 mérésnél volt, míg 0.53 a hold back. A megjelenő rövid holt idő viszont a nyomócsonknak tulajdonítható, hiszen a poz\_0\_1 mérésnél 115 min, míg a poz\_2\_0 kísérletnél 4.5 min holtidőt tapasztaltam.



**55. ábra: Egységugrás függvényre adott eloszlásfüggvények a; negatív ugrás függvény b; pozitív ugrás függvény esetén poz\_2\_1 csonkpozíció vizsgálatokor**

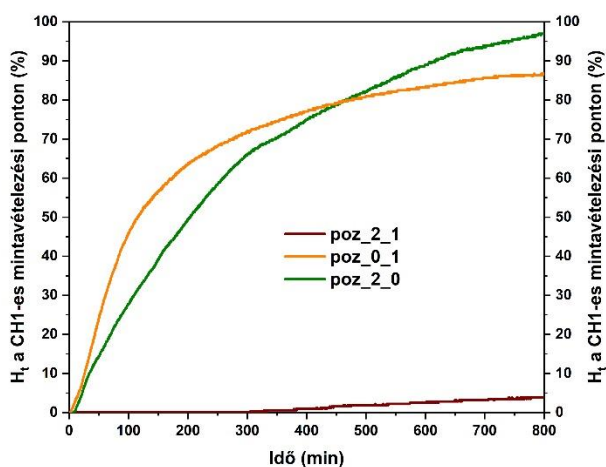
A pozitív egységugrás függvényre adott eloszlás függvény (55. ábra b;) esetén azonban javulást figyeltem meg a kombinált csonk pozíció alkalmazásakor. A tartózkodási idő várható értéke a poz\_2\_0-hoz (3.06 h) képest 1 órával csökkent, ennek megfelelően nagyobbak kell lennie a rendszer holt térfogatának. A holt térfogat ebben az esetben 42 %-ra nőtt.

## Eredmények és kiértékelés

20. táblázat: poz\_2\_1 kombinált csonek pozíciók hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra (neg.=negatív egységugrás függvény, poz.= pozitív egységugrás függvény)

Mérés jele	poz_2_1		poz_0_1		poz_2_0	
Egységugrás függvény	neg.	poz.	neg.	poz.	neg.	poz.
Tartózkodási idő várható értéke (h)	-	2.04	2.94	-	2.53	3.06
H (-)	0.16	0.48	0.18	0.49	0.53	0.41
Holtidő (min)	3.5	10.5	115	0	4.5	9
Holt térfogat (%)	-	42	17	-	28	13

A recirkulációs vizsgálat eredménye a vártak megfelelően alakult. Mivel mind a szívó, mind a nyomó csonek a híg folyadék rétegben volt, így a szivattyú ezt az 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldatot keringette. A koncentráció változás minimális volt a CH1-es mintavételezési ponton, a homogenitás 800 min recirkulációs idő után is mindössze 5 % lett (56. ábra).



56. ábra: Homogenitás a CH1-es mintavételezési ponton poz\_2\_1 kombinát csonek pozíció vizsgálatokor



## Eredmények és kiértékelés

### 3.3.3 poz\_2\_3 csonk kombináció

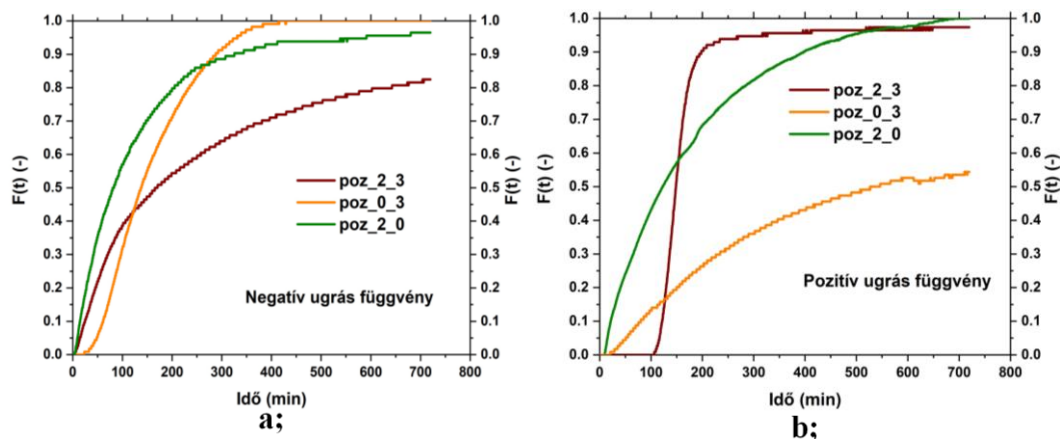
A poz\_2\_3 csonk kombináció alkalmával a szívócsonk 77 mm-re, míg a nyomócsonk 25 mm-re volt a tartály fenekétől.

Az egységugrás függvényekre adott válaszfüggvények poz\_2\_3 kombinált csonk pozíció alkalmazása esetén eltérően alakulnak a korábbi megfigyelésektől. Eddig negatív egységugrás függvény esetén kaptam ideális csőre jellemző eloszlás függvényt és pozitív ugrás függvényre kaptam a tökéletesen kevert üstre jellemző, exponenciális trendű görbét (53. ábra, 55. ábra). Poz\_2\_3 mérés eredményeként az ellenkezőjét tapasztaltam (58. ábra). Negatív egységugrás függvényre adott eloszlás függvény a kísérleti idő alatt, 12 h, nem érte el az 1-et. A mérés elején 4 min holtidőt regisztráltam, de ez a teljes mérési időhöz képest elhanyagolható. A sűrűség függvény integrálja ebben az esetben került az elfogadható hibahatáron ( $\pm 5\%$ ) kívülre. Eddigieknél ez a pozitív ugrás függvény során fordult elő. A hold-back értékre 0.35-öt kaptam, ami közel azonos a poz\_0\_3-ra kapott értékkel (0.34) (21. táblázat).

A mérés során CH1-es mintavételezési ponton rögzített sűrűség adatok (58. ábra a;) azt mutatják, hogy a kombinált nyomócsonk pozíció alkalmazása ront a homogenizálás hatékonyságán, hiszen a sűrűség lassabban csökken a CH1-es elektród környezetében és nem is éri el a kívánt  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűséget. Ennek oka az lehet, hogy míg a poz\_0\_3-nál a nyomócsonkból a híg oldat a folyadék felszín felé tart, közben a szívócsonkon keresztül folyamatosan távozik a tömény oldat réteg a tartályból, addig ebben az esetben (poz\_2\_3) a szívócsonk a felhajtó erő következtében kialakult kevert oldatot távolítja el a rendszerből.

A kombinált nyomócsonk keverésre gyakorolt negatív hatása, a különböző mintavételi magasságokból (59. ábra a;) vett minta sűrűség eredményei is alátámasztják. Látszik, hogy ebben a szívó-nyomó csonk párosításban a tartály alsó 25 mm-es magasságában, a betáplálási csonk alatt jóformán nem történt koncentráció változás.

## Eredmények és kiértékelés



57. ábra: poz\_2\_3 kombinált csomkpozíció eloszlás függvényei a; negatív egységugrás esetén b; pozitív egységugrás esetén

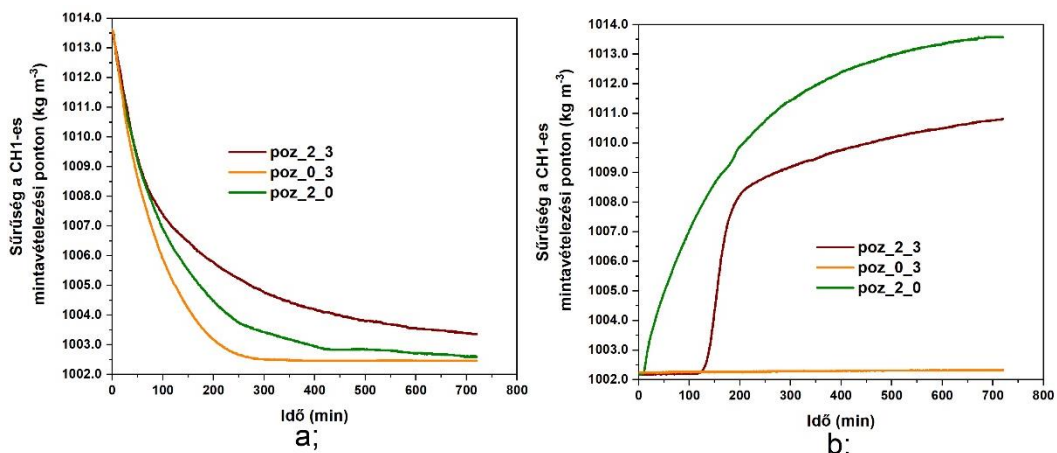
Pozitív egységugrás zavaró függvény alkalmazásakor (57. ábra b;) jelentős konstans szakasszal kezdődő eloszlás függvényt kaptam, utána éles növekedést tapasztaltam majd megint konstans szakaszt. Ez az ideális cső egységugrás függvényre adott válaszfüggvénye. Ez a válasz függvény teljesen eltér a poz\_2\_0 és poz\_0\_3 mérések során kapottaktól, továbbá az eddigi pozitív egységugrás függvényre adott válaszfüggvényektől.

21. táblázat: Kombinált csomk pozíciók hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra (neg.=negatív egységugrás függvény, poz.=pozitív egységugrás függvény)

Mérés jele	poz_2_3		poz_0_3		poz_2_0	
	neg.	poz.	neg.	poz.	neg.	poz.
Tartózkodási idő várható értéke (h)	-	2.67	2.91	-	2.53	3.06
H (-)	0.35	0.28	0.34	0.13	0.42	0.41
Holtidő (min)	4	106	24	21	21.5	9
Holt térfogat (%)	-	24	18	-	27	13

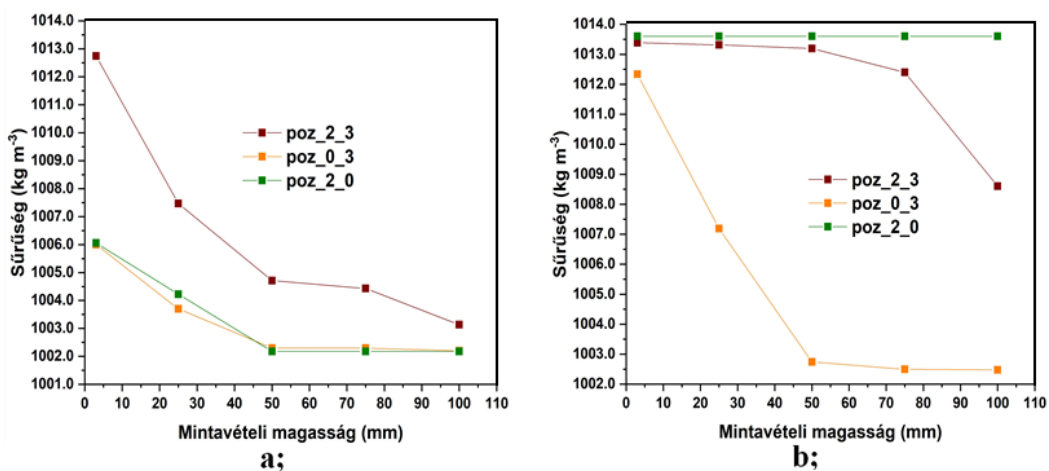
A CH1-es mintavételezési ponton mért sűrűség alapján javítja a poz\_2\_3 csomk kombináció a keverést a poz\_0\_3 méréshez képest, de rontja ahhoz képest, mikor a szívó csomk a tartály felső harmadában (77 mm) a nyomócsomk pedig a folyadék felszín felett (120 mm) van (poz\_2\_0) (58. ábra).

## Eredmények és kiértékelés



**58. ábra: CH1-es mintavételezési ponton rögzített sűrűség eredmények a; negatív egység ugrás függvény során b; pozitív egységugrás függvény során**

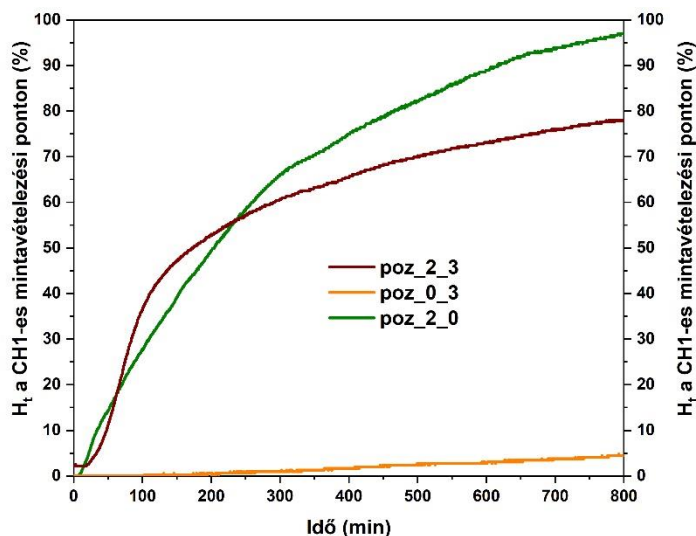
A poz\_0\_3-hoz képesti javulást mutatja a különböző folyadékmagasságokból vett minták (7. táblázat) sűrűsége is (59. ábra b;), míg poz\_0\_3 esetben a folyadék felső felében nem történt koncentráció változás addig a poz\_2\_3 beállítás esetén a folyadék felszín tetején mért sűrűség 1007.9 kg m<sup>-3</sup>.



**59. ábra: Sűrűség különböző mintavételi pontban a; negatív egység ugrás függvény után b; pozitív egységugrás függvény vizsgálat után**

A recirkulációs mérés CH1-es mintavételezési ponton számított homogenitás eredményeit megfigyelve azt láthatjuk, hogy a tartályban a poz\_0\_3-jelű csanak pozícióhoz képest jelentős javulást értem el, azonban a poz\_2\_0-hoz képest némi romlást. A poz\_2\_3 homogenitás görbéjén a 1013.6 kg m<sup>-3</sup> betápláláshoz hasonlóan (58. ábra b;) konstans szakaszt fedeztem fel.

## Eredmények és kiértékelés



60. ábra: Homogenitás a CH1-es mintavételezési ponton

### 3.4 Geometria hatása

A geometria hatásának vizsgálatához 5 henger elemből álló tartályt alkalmaztam, mely egy beépíthető válaszfal segítségével 1 és 3 hengerelem számú konstrukcióvá alakítható (28. ábra). A geometria hatásának vizsgálata céljából állandó 3 h-s átlagos tartózkodási időt választottam, ennek megfelelően a betáplálási térfogatáram változott (9. táblázat). A keverési tulajdonságok megismerése céljából elsőként negatív és pozitív egységugrás függvényvel végeztem tartózkodási idő eloszlás vizsgálatokat (22. ábra), majd a recirkulációs méréseket (23. ábra) is végrehajtottam.

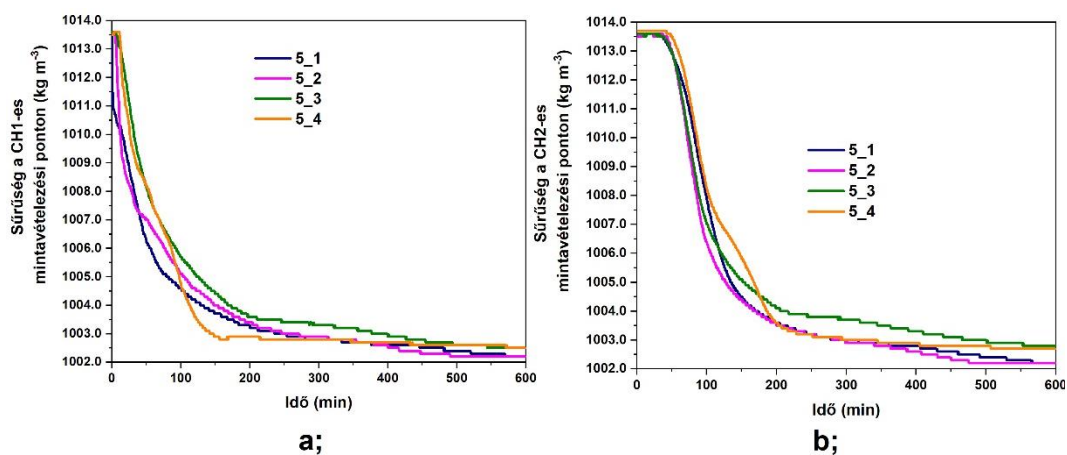
#### 3.4.1 CH1-es mintavételezési pont helyzetének vizsgálata

A geometria hatásainak vizsgálata előtt felmerült bennem a kérdés, hogy vajon 5 henger elemszámú tartály esetén hova pozicionáljam a CH1-es elektródot. A kísérleteket úgy hajtottam végre, hogy a CH2-es elektród mindig ugyanabban a pozícióban helyeztem el a kilépési csomagtól, míg a CH1-es elektród x-irányú helyzetét változtattam, így 4 mérést végeztem el (8. táblázat). A nyomócsomagtól (3.1.1 fejezet) tapasztaltak miatt, miszerint a negatív egységugrás betáplálásánál nagyobbak a különbségek az eredmények között, mint pozitív egységugrás függvény esetén, ezért a következő kísérletsorhoz negatív egységugrás függvényt választottam zavaró függvényül.

## Eredmények és kiértékelés

A CH1-es mérési ponton kapott sűrűség adatok (61. ábra a;) annyiban különböznek, hogy a betáplálási csontól való távolságtól függően változik a mérés elején megjelenő konstans szakasz hossza. Az 5\_1 mérés esetén a holt idő 0 min, 5\_2-nél 4.5 min, 5\_3-nál 6 min míg az 5\_4-es jelű kísérletnél 11 min. Azonban még a 11 min is elhanyagolható a 600 min-os vizsgálati időhöz képest, továbbá a geometria vizsgálatánál a CH2-es mintavételezési ponton mért adatokra támaszkodom elsősorban, hiszen azok minden mérésnél ugyanabban a pozícióban voltak. A szórás eredményeken (62. ábra) is az látszik, hogy a négy pozíció sűrűség adataiban a kísérleti idő első 100 percében van nagyobb szórás, de a maximum ( $1.6 \text{ kg m}^{-3}$ ) is messze az 5 %-os hibahatáron belül van. Az eredmények alapján a CH1-es elektródot a továbbiakban minden tartálykonstrukcióban csak egy pozícióban fogom elhelyezni.

A kísérlet sorozat továbbá alkalmas volt arra, hogy megállapítsam a méréseim reprodukálhatóságát, melyhez a CH2-es mintavételezési ponton kapott sűrűség adatokat (61. ábra b;) használtam. A sűrűség görbéken látszik, hogy azok lefutása jóformán azonos. A 100 és 200 min között van némi szórása az eredményeknek, mely maximálisan  $0.9 \text{ kg m}^{-3}$  (62. ábra). A sűrűség eredmények és azok szórása alapján a méréseimet reprodukálhatónak tartom.

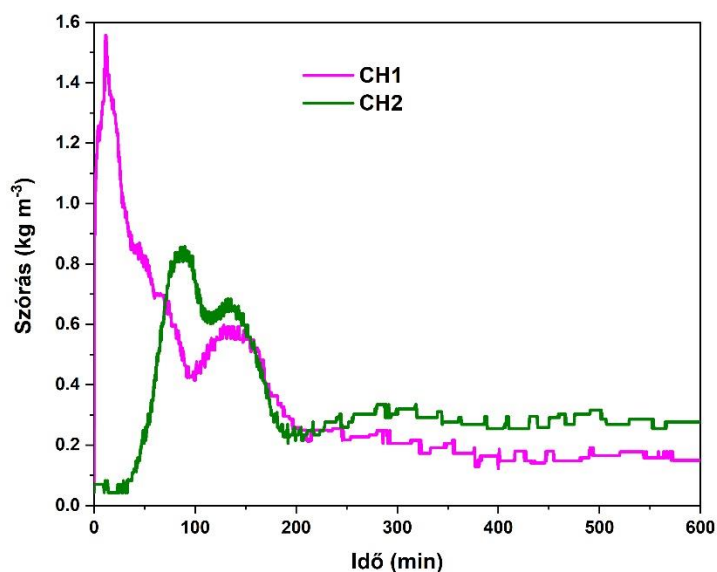


**61. ábra: 5 henger elemszámú tartály konstrukció esetén a négy CH1 elektród pozíció esetén kapott sűrűség adatok negatív egységgrás betáplálás esetén a; CH1-es b; CH2-es mintavételezési ponton**

A szórás értékét (3-2) a kilépési csontkon kapott négy mérési (n=4) eredményből határoztam meg adott időpillanatban.

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|^2}{n}}$$

3-2

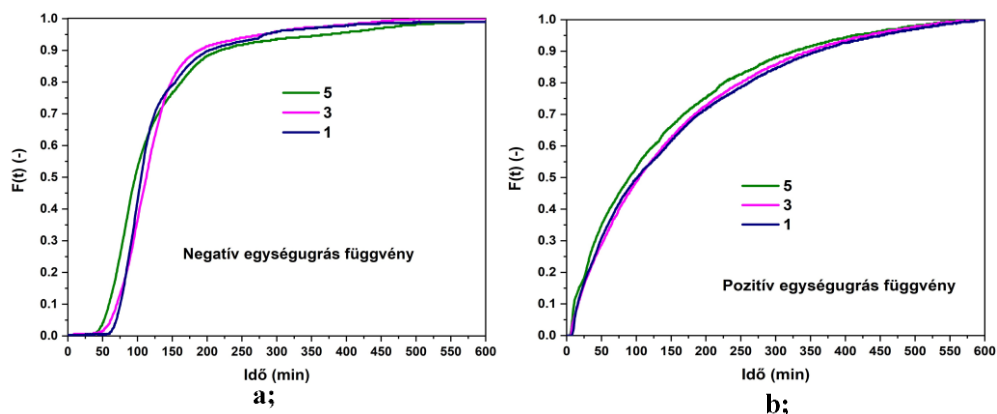


**62. ábra: 4 kísérlet sűrűség eredményének szórása a CH1 és CH2 mintavételezési ponton**

### 3.4.2 Tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok

Tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok során a poz\_1\_0-jelű (3.1.1 fejezet) mérés alkalmával tapasztaltakat figyeltem meg. Negatív egységugrás zavarófüggvény alkalmazásakor (63. ábra a;), henger elemszámtól függetlenül megfigyelhető egy konstans szakasz mely a holtidőt mutatja a rendszerben. A holtidő után élesen növekedő periódus mutatkozik, majd újra konstans szakasz. A pozitív egységugrás függvény zavarásakor (63. ábra b;) a válaszfüggvény a már ismert exponenciális jelleget veszi fel és a görbék hengerelem számtól függetlenül közel együtt haladnak.

## Eredmények és kiértékelés



**63. ábra: Egységugrás függvény alkalmazása különböző henger elemszámú geometria vizsgálatára a; negatív egységugrás függvény válaszfüggvénye b; pozitív egységugrás függvény válaszfüggvénye**

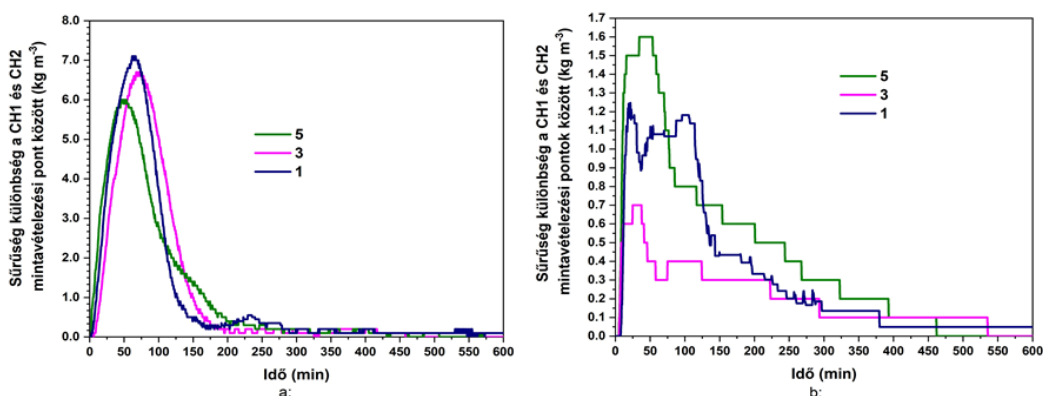
Az átlagos tartózkodási idő, konstans 3 h volt minden kísérlet során. A tartózkodási idő várható értéke minden esetben kevesebb volt ennél (22. táblázat), így az összes tartály konstrukció esetén számolnunk kell olyan folyadék térfogatokkal, melyek a külső keverés szempontjából inaktívak. A tartózkodási idő várható értékét befolyásolja a hengerelemek száma, de lineáris trend nem figyelhető meg negatív egységugrás zavaró függvény alkalmazásakor. A legkisebb folyadék térfogathoz (1500 ml) tartozik a legkisebb várható érték (2.15 h). 3 henger esetén kaptam a legnagyobb (2.33 h) értéket, míg 5 henger esetén a kettő közé eső eredményt (2.23 h). A holt térfogat a tartózkodási időnek megfelelően alakul. Minél kisebb a tartózkodási idő várható értéke, annál nagyobb a holt térfogat. Pozitív egységugrás zavaró függvénnyel végzett kísérletek eredményeül azt tapasztaltam, hogy a hengerelem szám növekedésével a tartózkodási idő várható értéke csökken, ennek megfelelően a holt térfogat nő.

## Eredmények és kiértékelés

**22. táblázat: Geometria hatása a tartózkodási időre, hold-back értékre és holt térfogatra (neg.=negatív egységugrás függvény, poz.= pozitív egységugrás függvény)**

Henger elemszám	1		3		5	
Egységugrás függvény	neg.	poz.	neg.	poz.	neg.	poz.
Tartózkodási idő várható értéke (h)	2.15	2.48	2.33	2.43	2.23	2.24
H (-)	0.37	0.42	0.36	0.42	0.40	0.46
Holtidő (min)	56	8	45	6	39	5
Holt térfogat (%)	29	18	23	19	27	27

A CH1 és CH2 mintavételezési pontokon kapott sűrűségek különbségeiből az látszik (64. ábra), hogy negatív egységugrás függvény (64. ábra a;) alkalmazásakor nagyobb a különbség ( $7.0 \text{ kg m}^{-3}$ ), mint pozitív egységugrás során ( $1.6 \text{ kg m}^{-3}$ ) (64. ábra b;). Elsőre látszik, hogy  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálásakor a görbék lefutása simább, mint a  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  oldat használatakor. Negatív egységugrás zavaró függvény alkalmazása során a sűrűségkülönbség csökken a henger elemszámmal, ez nem tapasztalható a  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálásakor. Mindkét sűrűségű oldat betáplálásakor megfigyelhető, hogy a nagy sűrűségkülönbségek a mérés elején jellemzőek, majd lecsengenek, míg nulla nem lesz. Pozitív egységugrás függvény betáplálásakor (64. ábra b;) hosszú lecsengése van, 400 min, és a negatív egységugrás függvény (64. ábra a;) során a sűrűségkülönbség gyorsabban csökken, körülbelül 200 perc alatt 0-ra esik a sűrűségkülönbség.

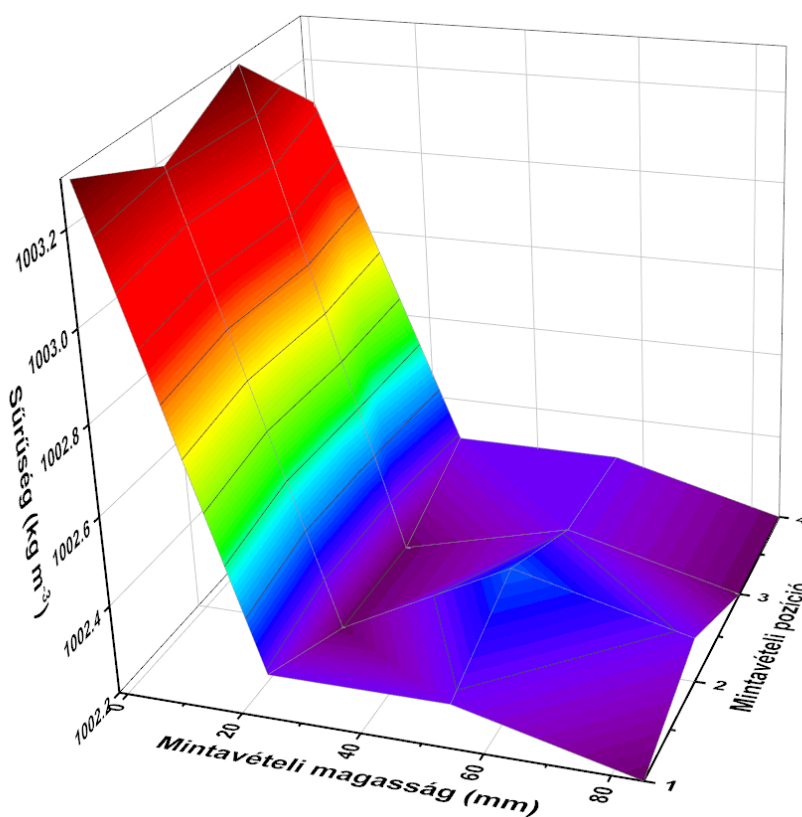


**64. ábra: CH1 és CH2 mintavételezési pontok között mért sűrűségkülönbség különböző henger elemszám függvényében a; negatív egységugrás során b; pozitív egységugrás során**



## Eredmények és kiértékelés

A kísérletek után mintákat vettem a tartály szűkületi pontjaiból különböző magasságokban (10. táblázat). A 4-es mintavételi pozíció a tartály elvételi, míg az 1-es a betáplálási csonkjához volt közel. A kísérletek utáni mintavételek eredményei negatív egységugrás zavaró függvény alkalmazásakor (65. ábra) azt mutatták, hogy a tartály fenekén lévő vékony folyadékrétegen kívül a kívánt  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat van a rendszerben. A tartály aljáról vett minta átlagosan  $1003.3 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű. 1 henger elemet tartalmazó tartály esetén is ezt tapasztaltam, a három hengerelem esetén viszont a tartály alján sűrűbb oldat maradt vissza,  $1004.5 \text{ kg m}^{-3}$ .



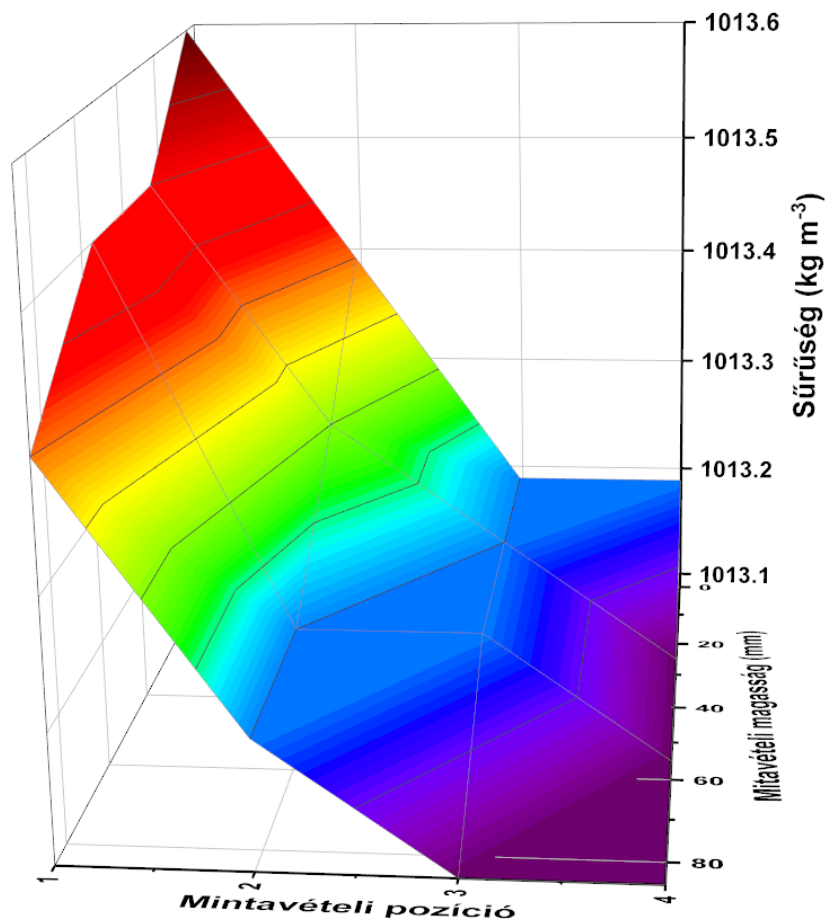
**65. ábra: 5 hengerelemű tartály esetén vett minták sűrűsége  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálása után**

$1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  oldat betáplálása után vett minták sűrűség eredményeiben némi különbséget tapasztaltam (66. ábra). A nyomócsonktól ( $\sim 1$ -es mintavételi pozíció) a szívócsonkig ( $\sim 4$ -es mintavételi pozíció) hígulást figyeltem meg, a tartály alján  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$ -ről  $1013.2 \text{ kg m}^{-3}$ -ra, míg a tartály felszínén  $1013.4 \text{ kg m}^{-3}$ -ről  $1013.1 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűsége. Ebből látszik, hogy némi különbség van horizontálisan

## Eredmények és kiértékelés

illetve vertikálisan is. A horizontális sűrűség csökkenés annak tulajdonítható, hogy a szívócsonk hatása annak közvetlen környezetében jobban érzékelhető.

1 hengerelem esetén nem mértem sűrűségkülönbséget a mintavételi pontok között.



**66. ábra: 5 hengerelemű tartály esetén vett minták sűrűsége 1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálása után**

Az adatok további kiértékeléséhez a szegregáció értékének grafikus meghatározását használtam (17. ábra).

Az eredményeken (23. táblázat) az látszik, hogy 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálásakor a szegregáció nagyobb, azaz inkább cső jellegű, mint pozitív egységugrás vizsgálatok. A hengerelem szám csökkentésével a szegregációs érték nő, azaz egyre inkább cső jellegű az áramlás a tartályon belül. 1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálásakor a szegregáció üst jellegre utal. A hengerelem szám

## Eredmények és kiértékelés

növelésével a tökéletesen kevert üstre jellemző kevertség erősödik. A holt térfogatra jellemző negatív szegregációs érték egyik mérés esetén sem jelenik meg.

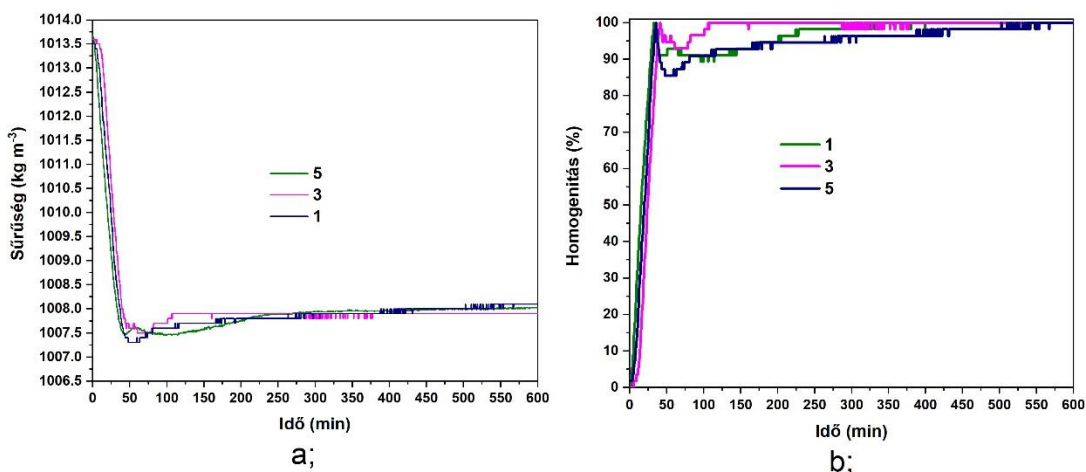
**23. táblázat: Szegregáció értéke a betáplált oldat sűrűsége és a henger elemszám függvényében**

Betáplált oldat sűrűsége (kg m <sup>-3</sup> )	1002.2			1013.6		
	1	3	5	1	3	5
Hengerelem szám (db)						
Szegregáció (-)	0.19	0.16	0.12	0.04	0.03	0.03

A recirkulációs kísérletek során rögzített vezetőképesség értékekből számolt sűrűség (67. ábra a;) adatok alapján nem látható jelentős különbség a hengerelemek számának függvényében. A keverési idő első 50 percében a koncentráció közel lineárisan csökken mind három konstrukció esetén, majd az átlagos koncentráció alá csökken a sűrűség. Ez a „hígulási” szakasz az 1 hengerelemet tartalmazó konstrukció esetén a legmeredekebb, míg 5 hengerelem esetén elnyúlt ez a szakasz. 1 és 3 hengerelem számú tartállyal végzett kísérlet során az átlagos koncentrációt kaptam vissza a 100. perc körül. Az 5 hengerelemet tartalmazó tartály esetén a 225-dik perctől mértem az átlagos koncentrációt.

A mérési adatok további összehasonlítása céljából homogenitást számoltam a kilépési csonkra. Az éles, kezdeti, lineáris szakasz így még nyilvánvalóbb (67. ábra b;). A hígulási szakasz is jól látszik. Érdekes, hogy ez a jelenség a tartály térfogatától függetlenül megjelenik, továbbá a 3.1 dm<sup>3</sup>-es tartályban is ugyanilyen híguló szakaszt figyeltem meg a 7 mm magasságban lévő csonk pozíció esetén (42. ábra a;)

## Eredmények és kiértékelés

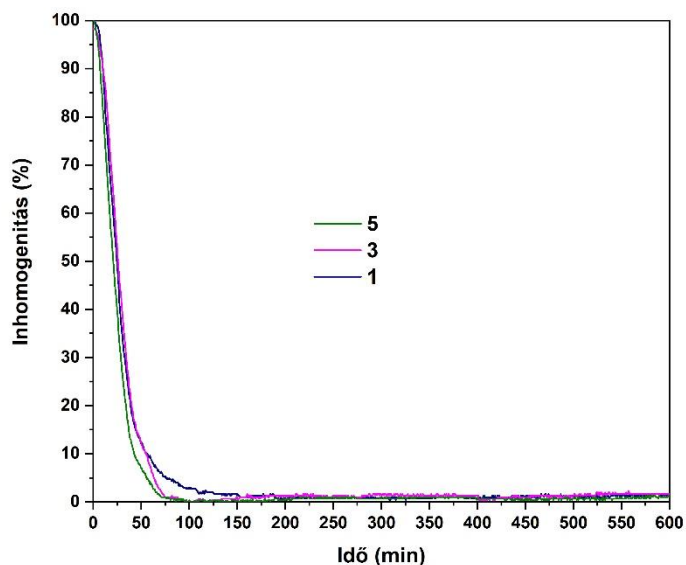


**67. ábra: Recirkulációs kísérletek során kapott a; sűrűség eredmények a CH2-es mintavételezési ponton b; homogenitás eredmények a CH2-es mintavételezési ponton**

A két mérési ponton mért sűrűség kiértékelését inhomogenitás (3-3) értékben végeztem (68. ábra).

$$I_t(\%) = \left( \frac{|c_t - c_{\text{átl}}|}{\Delta c} \right) * 100 \quad 3-3$$

A két mérési pont között a koncentráció különbség az 5 hengerelem számú geometria esetén csökken a leggyorsabban, leglassabban az 1 hengerelem során. A geometria hatása némileg megfigyelhető azonban 100 min alatt mind három tartály konstrukció esetén 5 % alatti inhomogenitási értéket kapunk.



**68. ábra: Inhomogenitás a két mérési pont között**

### 3.5 Nagy laboratóriumban kapott eredmények

Nagy laboratóriumi tartályban végrehajtott tartózkodási idő kísérletek sűrűség eredményei (69. ábra) azt mutatják, hogy a különböző mintavételezési ponton mért sűrűségek jobban eltérnek egymástól  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálása (69. ábra a;) esetén, mint  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  betáplálásakor (69. ábra b;).

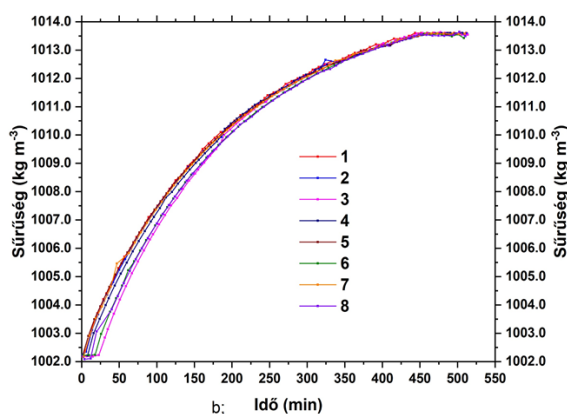
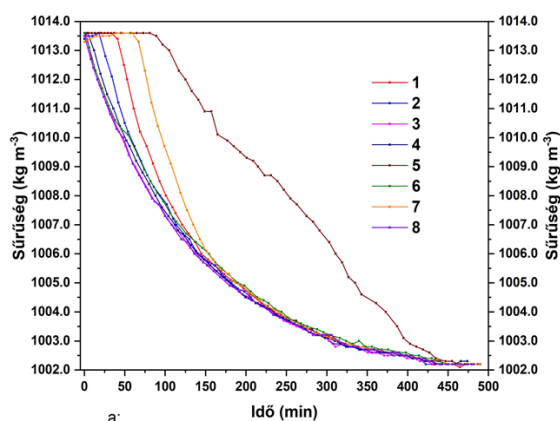
Az adott mérési ponton mért sűrűségek időbeli változásának oka az elektródok pozíciójában keresendő (11. táblázat). Az 5-ös mintavételezési pont a tartály fenekétől 1 cm-es magasságban, mind a szívó, mind a nyomó csonktól távol került elhelyezésre. Ez magyarázatot ad arra, hogy miért azon a mérési ponton változik leglassabban a koncentráció, hiszen a hígabb  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű betáplált oldat a tömény,  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  oldat tetején kerül szét a fajsúlykülönbség okozta felhajtó erő miatt. A sűrűség a 97-dik percben indul csökkenésnek és a 463-dik percben (24. táblázat) állandósul az elvárt  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  értéken. A holtidő hossza az elektród vertikális pozíciójától függ, melyet bizonyít az 1-3 és 7-8 pontokon felvett sűrűség eredmények. Az 1-es mintavételezési pontot közvetlenül a szívócsonk fölött helyeztem el, 3 cm-es magasságban, míg a 3-as mintavételezési pont közel ugyan abban a vertikális pozícióban volt, de 21.5 cm-es magasságban. A kilépési csonkon (1) a holt idő 41 min volt, míg a 3-as mintavételezési ponton 11 min. Továbbá a 3-as mintavételezési ponton kaptam legelőször az elvárt  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$ -es sűrűséget. Abban az esetben, ha összehasonlítom a 7-es és 1-es mintavételezési pontokat egymással az eddigiek alapján némi ellentmondást tapasztaltam. A kilépési csonkon korábban tapasztaltam sűrűség csökkenést, mint a 7-es mérési ponton, holott az magasabban, 65 cm-en, volt elhelyezve. Ennek az az oka, hogy a szivattyú, annak ellenére, hogy kis térfogatárammal működik mégis generál némi szívó hatást, így a szívó csonk környezete kevertebb, mint a tartály többi pontja.

## Eredmények és kiértékelés

**24. táblázat: 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálásakor kapott holt idők (t<sub>h</sub>) és az elvárt 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat eléréséhez szükséges idő**

Mintavételezési pontok	Mintavételezési pont magassága (mm)	t <sub>h</sub> (min)	konstans 1002.2 kg m <sup>-3</sup> eléréséhez szükséges idő (min)
3.	215	11	416
6.	210	6	438
8.	200	8	428
4.	125	12	422
2.	110	18	423
7.	65	67	427
1.	30	41	429
5.	10	97	463

A mintavételezési pontokon mért sűrűségek (69. ábra a;) alapján elmondható, hogy helytelen elgondolás a tartály átlagos koncentrációjára a kilépési csonton mért koncentráció alapján következtetni.



**69. ábra: Nagy laboratóriumi tartályban végzett kísérletek sűrűség eredményei**

**a; 1002.2 kg m<sup>-3</sup> b; 1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálása esetén**

## Eredmények és kiértékelés

1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálása esetén az adott mintavételezési ponton rögzített adatokból számolt sűrűség görbék jobban együtt futnak (69. ábra b;), mint a negatív ugrás függvény alkalmazása esetén. Holtidő ebben az esetben is megfigyelhető, mely az elektród magasságától függ, minél magasabban van annál hosszabb (25. táblázat). Míg az 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálásánál a 3,6,8,4-es elektródok esetén volt a legrövidebb a holtidő, addig a tömény oldat betáplálásakor ezeknél mértem a leghosszabbat. 1013.6 kg m<sup>-3</sup> oldat betáplálásakor azonban a holt idők közötti eltérések pár percben mérhetők, nem úgy, mint a híg oldat betáplálásakor. Továbbá a kívánt sűrűségű oldat elérését is 1 ciklusban (a 8 elektród egymás után mért 1-1 percen keresztül, így egy ciklus 8 percig tartott), mértem vissza, azaz, tömény oldat betáplálása esetén jóval egységesebb a koncentrációváltozás a tartály térfogatban, mint híg oldat betáplálásakor.

**25. táblázat: 1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálásakor kapott holt idők (t<sub>h</sub>) és az elvárt 1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat eléréséhez szükséges idő**

Mintavételezési pontok	Mintavételezési pont magassága (mm)	t <sub>h</sub> (min)	konstans 1013.6 kg m <sup>-3</sup> eléréséhez szükséges idő (min)
3.	215	31	438
6.	210	26	441
8.	200	20	443
4.	125	16	447
2.	110	6	445
7.	65	11	442
1.	30	5	436
5.	10	9	440

Az eredmények részletesebb elemzéséhez a kilépési csonkon rögzített átmeneti függvényből tartózkodási idő eloszlás függvényt és átlagos kort (1-54) számoltam, továbbá meghatároztam az elektródok környezetére (1-55) jellemző átlagos kort is (26. táblázat).

A számolt eredmények alapján a tartály egészére jellemző átlagos kor közel egyenlő a tömény (78.5 min) és híg oldat (71.8) betáplálása esetén. 1013.6 kg m<sup>-3</sup> betáplált oldat alkalmazásakor azért lehet nagyobb 6.7 perccel az átlagos kor, mivel a tömény oldat a tartály fenekére süllyed. A szívócsonk azonban benyúlik a

## Eredmények és kiértékelés

tartályba és az elektród, mely a kilépési koncentrációt hivatott regisztrálni feljebb, a csomk fölött van. A tömény oldatnak így a tartály fenekétől kell eljutnia az elektródig.

Az elektródok közvetlen közelében lévő térfogatra jellemző átlagos korokban híg oldat betáplálása esetén jelentős eltérés van. A legkisebb kort, 53.7 percet, a 8-as mintavételezési ponton kaptam, mely a betáplálási csomk közelségének köszönhető. A legnagyobb kort, 159.3 min, az 5-ös elektród környezetére számítottam, ami azt mutatja, hogy a tartály fenekéhez közeli folyadék réteg némileg szegregált a tartály többi folyadékeleméhez képest. Összességében elmondható, hogy  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálása esetén annál rövidebb az adott folyadéktérfogatban tartózkodó molekulák átlagos kora, minél közelebb van a folyadék felszínhez.

$1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálása esetén az elektródok környezetében lévő folyadéktérfogatra jellemző átlagos korokban nincs nagy eltérés, max. 16.5 min. Ez nem meglepő, hiszen a sűrűség eredményekben sem volt jelentős eltérés.

**26. táblázat: Tartályra jellemző átlagos kor és az elektródok környezetére jellemző átlagos kor különböző sűrűségű betáplált oldat esetén**

	<b><math>1002.2 \text{ kg m}^{-3}</math> betáplált oldat</b>				<b><math>1013.6 \text{ kg m}^{-3}</math> betáplált oldat</b>			
	<b><math>\bar{\alpha}</math> (min)</b>	<b><math>\bar{\alpha}_p</math> (min)</b>	<b>var <math>\bar{\alpha}</math> (min<sup>2</sup>)</b>	<b>var <math>\bar{\alpha}_p</math> (min<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\bar{\alpha}</math> (min)</b>	<b><math>\bar{\alpha}_p</math> (min)</b>	<b>var <math>\bar{\alpha}</math> (min<sup>2</sup>)</b>	<b>var <math>\bar{\alpha}_p</math> (min<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	71.8		13021.9		78.5	-	15284.4	-
<b>2</b>	-	65	-	1570.3	-	80.9	-	46
<b>3</b>		61.6				84.4		
<b>4</b>		76.3				81.3		
<b>5</b>		159.3				69.8		
<b>6</b>		61.3				75.7		
<b>7</b>		65.1				67.5		
<b>8</b>		53.7				76.3		

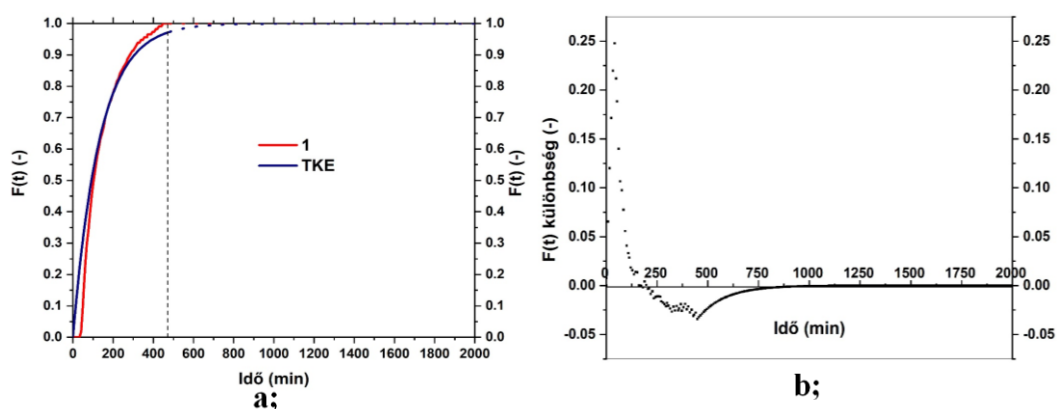
Ahhoz, hogy meghatározzam azt, hogy a tartály mennyire tökéletesen kevert, meg kellett vizsgálnom a tökéletesen kevert üst tartózkodási idő eloszlás



## Eredmények és kiértékelés

függvényének és a laboratóriumban kapott tartózkodási idő eloszlás függvénynek a különbségét (17. ábra).

Az  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  betáplált oldat esetén kapott eloszlás függvény (70. ábra a;) kezdeti szakaszán konstans rész tapasztalható, mely a holtidő következménye és cső jellegre utal, ezért nem meglepő, hogy az üst és a mért tartózkodási idő eloszlásfüggvények között a kezdeti szakaszban van a legnagyobb különbség (70. ábra b;), mely maximálisan 0.25. Az, hogy a különbség pozitív azt jelenti, hogy a vizsgált rendszer kevertsége elmaradt a TKE kevertségétől, majd a 150-dik perc körül megegyeznek egymással és a vizsgált rendszer tartózkodási idő eloszlás függvénye kerekedik a TKE-é fölé. A tartózkodási idő eloszlás függvényeket bemutató ábrán (70. ábra a;) látható függőleges szaggatott vonal a mérés idejét mutatja. Látható, hogy a mérési idő alatt (~ 500 min) a TKE tartózkodási idő eloszlás függvénye nem éri el az 1-et, ezért azt meghosszabbítottam. Az eloszlásfüggvények különbségéből (70. ábra b;) látszik, hogy ~750 min-ban lesz a két függvény különbsége 0. Ez arra utal, hogy a rendszerben holtterek vannak.

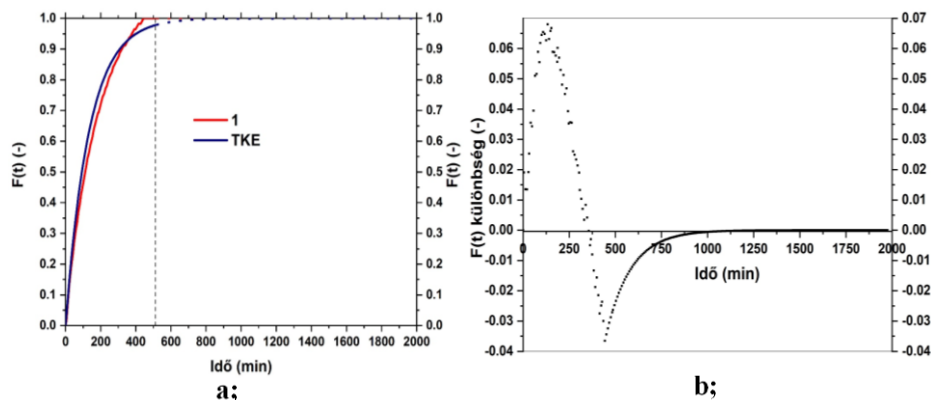


**70. ábra:  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű betáplált oldat esetén kapott (1) és a tökéletesen kevert üst (TKE) eloszlás függvénye b; a két eloszlás függvény különbsége**

$1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálásakor kapott tartózkodási idő eloszlás függvény és a tökéletesen kevert egység eloszlás függvénye között (71. ábra a;) a kezdeti szakaszban nem jelentős az eltérés, a két görbe közel együtt fut. Majd a laboratóriumban kapott eloszlás függvény elmarad némileg a tökéletesen kevertől. Látható, hogy ebben az esetben sem érte el a TKE eloszlás függvénye a mérés

## Eredmények és kiértékelés

időtartama alatt (~500 min) az 1-et, így ezt is meghosszabbítottam. A két görbe közti különbség a 400-dik perc körül lesz újra 0 (71. ábra b;), majd a laboratóriumban kapott eloszlás függvény meghaladja a tökéletesen kevert egység eloszlás függvényét.

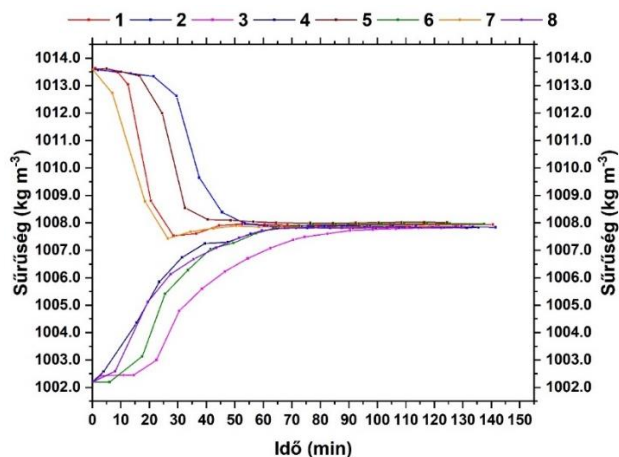


**71. ábra: 1013.6 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű betáplált oldat esetén kapott (1) és a tökéletesen kevert üst (TKE) eloszlás függvénye b; a két eloszlás függvény különbsége**

Fontos különbség az 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű betáplált oldathoz képest, hogy a legnagyobb különbség ebben az esetben 0.07 volt a két eloszlás függvény között, míg ez az érték híg oldat betáplálásakor 0.25 volt. Ez is mutatja, hogy az eloszlás függvény alapján a tömény oldat betáplálásakor kapunk tökéletesen kevert egységre jellemző eloszlás függvényt.

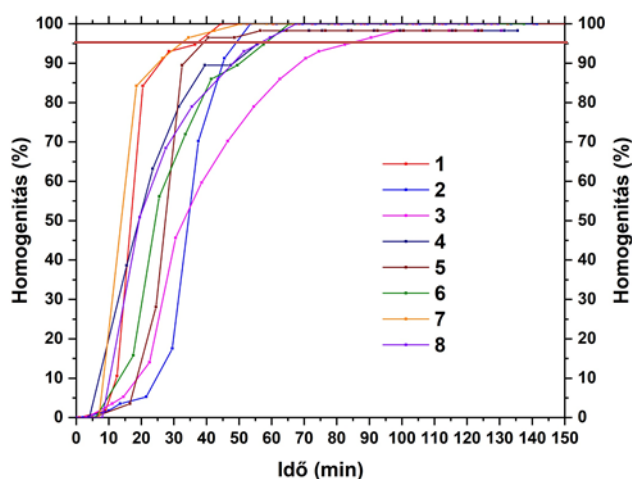
Recirkulációs mérés alkalmával a különböző mintavételezési pontokon rögzített sűrűség adatok a vártnak megfelelően alakultak (72. ábra). Azon elektródok sűrűség görbéi, melyek a tartály alsó felében, a tömény rétegben voltak elhelyezve, különböző sebességgel csökkeni kezdtek, míg azok melyek a híg rétegben voltak pozícionálva folyamatosan nőttek. A sűrűség változás sebessége a vertikális pozíciótól függött. Látható, hogy a növekvő sűrűség görbéket tekintve a 3-as elektród (215 mm) volt a leglassabb, míg a leggyorsabb a 4-es (125 mm). A csökkenő sűrűségű görbéket elemezve a 7-es jelű elektród sűrűség görbéje változott a leggyorsabban, melyet annak tudok be, hogy közel van a betáplálási csonkhoz.

## Eredmények és kiértékelés



**72. ábra: Nagy laboratóriumi tartályban végzett recirkulációs mérés során kapott sűrűség eredmények**

Az eredmények jobb áttekinthetősége miatt homogenitást számítottam (73. ábra) és jelöltem a nevezetes 95 %-os homogenitási kritériumot.



**73. ábra: Nagy laboratóriumi tartályban végzett recirkulációs mérés során számított homogenitás eredmények, 95 %-os homogenitás – piros vonal**

A számított homogenitás eredmények alapján elmondható, hogy a recirkuláció következtében létrejövő sűrűség változás, mind a 1013.6, mind a 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálásakor tapasztaltak összegződnek. A tartály feneké közelében elhelyezett elektródok (7., 1., 5.) homogenitása éri el legelőször, ugyanabban a mérési ciklusban, 35-41 min alatt a 95 %-os homogenitást. Utána azok az elektródok, melyek a két eltérő sűrűségű réteg érintkezése közelében voltak pozícionálva. Ezek is egy mérési ciklusban, 54-56 percen érik el vagy haladják meg a nevezetesen 95 %-os homogenitást. Ugyan ebben a mérési ciklusban a 6-os

## Eredmények és kiértékelés

és 8-as elektródok is meghaladják a kritikus értéket. A 3-as jelű mintavételezési ponton, mely 215 mm-re volt a tartály fenekétől 83 min kellett a 95 % homogenitási érték eléréséhez.

**27. táblázat: Nagy laboratóriumi tartályban végzett recirkulációs mérés során a 95 %-os homogenitás eléréséhez vagy meghaladásához szükséges idő**

Elektródok jele	95 % homogenitás eléréséhez szükséges idő (min)
7.	35
1.	37
5.	41
2.	54
4.	56
6.	58
8.	60
3.	83

### 3.6 Méretnövelés hatásai

A méretnövelés hatásának bemutatásához összehasonlítottam a kislaboratóriumi és a nagylaboratóriumi egyhengeres tartályban végzett kísérletek eredményeit. Továbbá leképeztem a tartályokat CFD szimulátorban és az eredményeket összevettem egymással.

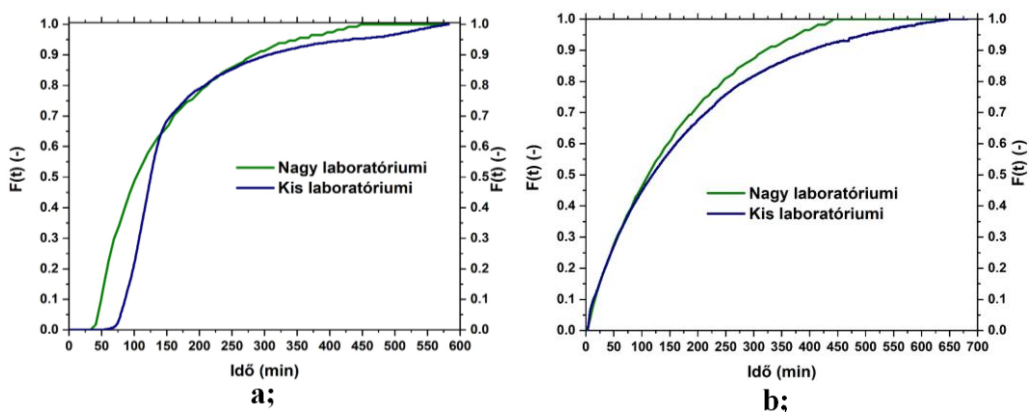
#### 3.6.1 Laboratóriumi mérések eredményei

A laboratóriumban végzett kísérletek eredményeit a korábban bemutatott módszerekkel értékeltem ki (tartózkodási idő eloszlás függvény alakja, holt idő, tartózkodási idő várható értéke, homogenitás függvény, szegregáció).

A tartózkodási idő eloszlás függvényeket ábrázoló diagramon (74. ábra) az láthatjuk, hogy betáplált oldat sűrűségétől függetlenül a nagylaboratóriumban gyorsabban megkapjuk az elvárt oldat sűrűséget a kilépési csonkon. Negatív ugrás függvény betápláláskor a kis laboratóriumban 579 min, míg a nagy laboratóriumban 429 min kellett a  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűség eléréséhez. Pozitív ugrás függvény alkalmazásakor a nagy laboratóriumban 436 min kellett, míg a kis laboratóriumban

## Eredmények és kiértékelés

640 min. Ezek a különbsége igen jelentősek,  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálásakor 3.4 h, mely megközelíti a 3.53 órás átlagos tartózkodási időt.  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  betáplált oldat vizsgálatakor a különbség 2.5 h. Ennek oka lehet, hogy a nagy laboratóriumi tartályban nagyobb a holt térfogat, mint a kis laboratóriumban. További észrevétel, hogy nagy laboratóriumban a betáplált oldat sűrűségétől függetlenül az átlagos tartózkodási idő legalább kétszerese kell, hogy a tartály teljes tartalma a kívánt sűrűségű oldatot tartalmazza. Ehhez képest a kis laboratóriumi tartályban negatív ugrás függvény esetén legalább 2.8-szorosa, míg  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  betáplálás esetén minimum a tartózkodási idő 3-szorosa szükséges.



**74. ábra: Kis és nagy laboratóriumi tartályban a tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok alkalmával kapott tartózkodási idő eloszlás függvények a;  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  b;  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  betáplálás esetén**

A tartózkodási idő várható értéke (28. táblázat), mind negatív, mind pozitív ugrás függvény alkalmazásakor kisebb a nagy laboratóriumi tartályban végzett kísérletek során, mint kis laboratóriumi párjainál. Az átlagos tartózkodási időnél, 3.53 h, minden esetben kisebb értéket kaptunk a tartózkodási idő várható értékére. Nagy laboratóriumban a betáplált oldat sűrűségétől függetlenül ugyanakkora a tartózkodási idő várható értéke (2.21 és 2.23 h). Ez a kis laboratóriumban némileg eltért, de a két tartózkodási idő várható értéke (2.75 és 2.90 h) között 9 perc a különbség, mely a mérés teljes időtartamát tekintve elenyésző, így ebben az esetben is tekinthetjük közel ugyanakkorának. A hold-back értékére a nagylaboratóriumban szintén nincs hatással a betáplált oldat koncentrációja, viszont  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  esetén a kis laboratóriumban számolt, 0.35, csőjellegét nem kapjuk vissza.  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$

## Eredmények és kiértékelés

betáplált oldat vizsgálatakor mind két méretben kapott hold-back érték holt térfogatra utal.

A holt időket (28. táblázat) tekintve a nagy laboratóriumban is egy nagyságrenddel nagyobbat kaptam  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  betáplált oldat során, mint  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  alkalmazásakor. Híg oldat betáplálásakor a nagy laboratóriumban (41 min) kisebb holtidőt mértem, mint a kis laboratóriumban (55 min). Töményebb oldat betáplálásakor a nagy laboratóriumban 5 min-ot, míg a kis laboratóriumban 2.5 min-ot kaptam, viszont ez köszönhető annak, hogy a nagy laboratóriumban ritkább a mintavételezés.

**28. táblázat: A méretnövelés hatása a tartózkodási idő várható értékére, a hold-backre, a holtidőre és a holt térfogatra (lab.: laboratóriumi)**

	$1002.2 \text{ kg m}^{-3}$		$1013.6 \text{ kg m}^{-3}$	
	Nagy lab.	Kis lab.	Nagy lab.	Kis lab.
<b>Tartózkodási idő várható értéke (h)</b>	2.21	2.75	2.23	2.90
<b>H (-)</b>	0.46	0.35	0.47	0.43
<b>Holtidő (min)</b>	41	55	5	2.5
<b>Holt térfogat (%)</b>	38	22	37	18

A korábban írt feltételezésem, miszerint a holt térfogat miatt „gyorsabb” a nagylaboratóriumi tartályban a keveredés beigazolódni látszik. Számításaim szerint a nagy laboratóriumban (38, 37 %) közel kétszer akkora a holt térfogat, mint a kis laboratóriumi tartályban (22, 18 %). Nagy laboratóriumban a holt térfogatra nincs hatással a betáplált oldat sűrűsége, a kis laboratóriumban is a 4 % különbség 124 ml-nek felel meg, mely elhanyagolható a teljes, 3100 ml-es folyadéktérfogathoz képest.

A számított átlagos korokból (26. táblázat) a nagylaboratóriumi tartályra a szegregáció (1-45) számítható. A kis laboratóriumi tartályban azonban csak két elektród volt elhelyezve, melyekből az egyik a kilépési áramot detektálta, így variancia nem kalkulálható. Kis laboratóriumi tartályban végzett kísérletek kiértékeléséhez a grafikus módszert (17. ábra) használtam. A két módszer közös

## Eredmények és kiértékelés

alkalmazásakor figyelembe kell venni, hogy a meghatározás menetének következtében mások a nevezetes szélsőértékek. Nagy laboratóriumi tartály vizsgálatokor  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű betáplálás esetén ( $S=0.120$ ) a szegregált rendszer jellemzője dominál, míg  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  ( $S=0.003$ ) egyértelműen tökéletesen kevert rendszer szegregációs értékét kaptam. A kis laboratóriumi mérések során is ezt a trendet tapasztaltam. Negatív ugrás függvény vizsgálatokor a kis laboratóriumi tartályban ( $S=0.155$ ) az ideális csőre jellemző szegregáltság mutatkozik (szegregáció pozitív előjelű), nem a holt térfogat jellegű (negatív előjelű), ez a definícióból (1.6 fejezet) adódik. Továbbá erősebb a szegregáltsági fok, mint nagy laboratóriumi társánál. Pozitív ugrás függvény alkalmazásakor egyértelműen tökéletesen kevert üstre ( $S=0$ ) jellemző értéket kaptam ( $S=0.007$ ) úgy, mint a nagy laboratóriumi tartály esetén ahol szintén molekuláris szinten kevert rendszer szegregációját kaptam.

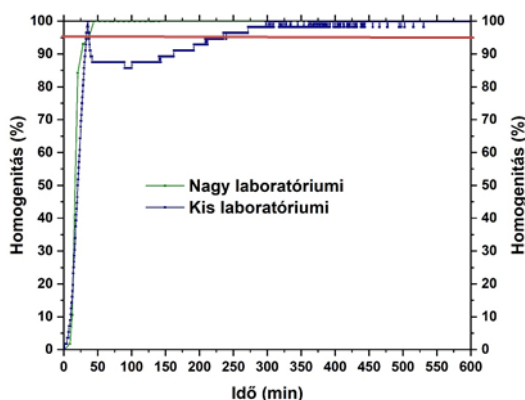
### 29. táblázat: A méretnövelés hatása a szegregációra (\*grafikus módszerrel meghatározott, lab.: laboratórium)

	$1002.2 \text{ kg m}^{-3}$		$1013.6 \text{ kg m}^{-3}$	
	Nagy lab.	Kis lab.	Nagy lab.	Kis lab.
Szegregáció (-)	0.120	0.155*	0.003	0.007*

A recirkulációs vizsgálatok összehasonlítása céljából a kilépési csomagtól elhelyezett elektródokon mért adatokból számolt homogenitást alkalmazom (75. ábra). Nagy laboratóriumi eredményekben a kis laboratóriumban tapasztalt „hígulási” fázist nem figyeltem meg. Kezdetben a homogenitás értékek közel együtt haladnak, majd a nagylaboratóriumban elérem a 95 %-os homogenitást, ami tovább nő, majd stabilizálódik 100 %-on. A nagy laboratóriumban a 37. percben értem el a 95 %-os homogenitási küszöb értéket, mely közel azonos időpont a kis laboratóriummal (33.5 min), viszont a kis laboratóriumban a végső 95 %-os homogenitási értéket a 236. percben mértem vissza a hígulási szakaszt követően. A recirkulációs mérés alkalmával is azt figyeltem meg, hogy a homogenizálódási folyamat gyorsabban lejátszódik nagyobb méretben, mint kisebbben.

## Eredmények és kiértékelés

A nagy laboratóriumban a megnövekedett holt térfogat oka és annak, hogy a keverési folyamatok gyorsabban lejátszódnak ebben a méretben, a térfogat fajlagosra jutó betáplált kinetikus energia (2-8) növekmény lehet. A kislaboratóriumi tartály esetén ez  $7.74 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-2}$ , nagy laboratóriumi tartály esetén egy nagyságrenddel nagyobb,  $2.11 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-2}$ . Nagy laboratóriumi tartályban elképzelhető, hogy a folyadék elemek pályája közvetlenebb a belépő és kilépő csomak között, mint a kis laboratóriumi tartályban továbbá a kis laboratóriumi tartályban a diffúzió, mint sebesség meghatározó folyamat jobban érvényesül, mint nagyobb térfogatban. Továbbá megjegyzendő, hogy a kis laboratóriumi méretben a gravitáció hatványozottan érvényesül a nagylaboratóriumi mérethez képest. A különbségek nem a méretnövelés hibájából fakad, hiszen az áramlás minőségét jellemző mérőszámok (pl.: szegregáció, tartózkodási idő) közel megegyeznek.



**75. ábra: Kis és nagy laboratóriumi tartályban a kilépési csomak mellett elhelyezett elektródokon kapott homogenitás**

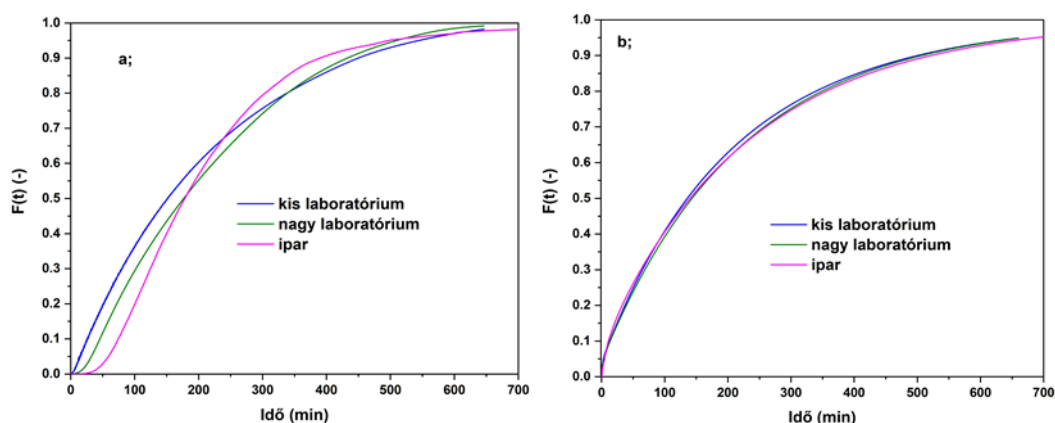
### 3.6.2 Szimulációs eredmények

A CFD szimulátorban leképeztem mind a három különböző mérettartományba eső tartályt (2.8. fejezet, 4. és 6. Melléklet). Az eloszlás függvényeket a kilépési csomakon detektált koncentrációból határoztam meg minden esetben. A negatív egységugrás függvényre adott válasz függvények (76. ábra a;) lefutásában van némi különbség azonban eloszlás függvények közel ugyanabban az időben (660 min) érik el a kívánt koncentrációt a kilépési ponton. Mindhárom méretben felvett eloszlás függvényre jellemző, hogy zérus meredekséggel indulnak. Minél nagyobb



## Eredmények és kiértékelés

a tartály térfogata, annál hosszabb a koncentrációváltozás nélküli fázis. A pozitív egységugrás zavarás alkalmazása esetén a válaszfüggvények (76. ábra b;) közel fedésben vannak egymással, a kis laboratóriumi tartály görbéje tér el némileg a többitől. A kapott eloszlás függvények a laboratóriumban tapasztaltaknak megfelelően exponenciális jellegűek.



**76. ábra: CFD szimulációk során kapott sűrűség görbék tartózkodási idő eloszlás vizsgálatok esetén különböző tartály méretben a; negatív egységugrás b; pozitív egységugrás függvény zavarás**

A tartózkodási idő várható értékek (30. táblázat) eredményeiből, mind negatív, mind pozitív egységugrás betáplálás esetén az látszik, hogy a tartály térfogat növekedésével a keverés tart az ideálishoz, azaz egyre kisebb a különbség a számított érték és az átlagos tartózkodási idő (3.53 h) között. A negatív egységugrás függvény alkalmazásakor az ipari és a kis laboratóriumi tartály tartózkodási idő várható értékére számított eredmények között a különbség 24 min, mely a teljes vizsgálati idő (660 min) 5 %-nál kevesebb. Pozitív egységugrás függvényénél a különbség 5 %. A tartózkodási idő várható értékeknek megfelelően a holtterfogat a tartály térfogattal csökken. Elmondható, hogy minél nagyobb a tartály térfogat, annál inkább a tartály teljes térfogatára kiterjedő áramlástér jön létre.

## Eredmények és kiértékelés

**30. táblázat: A méretnövelés hatása a tartózkodási idő várható értékére, a hold-backre és a holt térfogatra (lab.: laboratórium)**

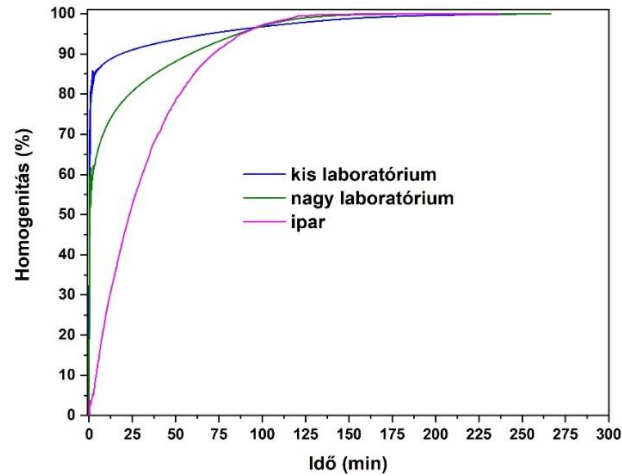
	1002.2 kg m <sup>-3</sup>			1013.6 kg m <sup>-3</sup>		
	Kis lab.	Nagy lab.	Ipari	Kis lab.	Nagy lab.	Ipari
$\tau$ (h)	3.11	3.42	3.52	2.71	2.80	3.3
H (-)	0.36	0.29	0.25	0.40	0.40	0.40
Holt térfogat (%)	12	4	0	23	21	7

A számított hold back értékek a negatív egységugrás zavarás függvénykor a tartály méretével csökkentek, azaz tartottak az ideális cső jelleg felé. A cső reaktor válaszfüggvénye konstans holt időszakkal indul. A mérési eredményeknél a cső jelleg az ipari tartály esetén a legdominánsabb (hold-back érték a legkisebb), ahol a holt idő a leghosszabb volt. Pozitív ugrás függvényekre adott válaszfüggvények vizsgálatakor a hold-back értékek azonosak voltak, 0.4. A hold-back értékek és a válasz függvények alakja alapján is tökéletesen kevert üst jelleget kaptam eredményül.

A tartózkodási idő eloszlás függvények összehasonlítása alapján elmondható, hogy a keverés dinamikájában van némi különbség a mérettől függően, azonban minden esetben azonos keverési idő szükséges a kívánt sűrűségű oldat detektálásához a kilépési csonkon.

Recirkulációs vizsgálatok eredményeül a kilépési csonkon kapott homogenitási eredményekben is van némi különbség a tartály méret függvényében. A különbség ebben az esetben is leginkább a homogenizálás dinamikájában van. Kisebb méretben jóval élesebben változik a koncentráció a tartályokban, míg ipari méretben inkább fokozatosan. Kis laboratóriumi méretben a legmeredekebb a koncentráció változás, azonban a 90 %-os homogenitási érték elérése után a görbe laposodik, kevésbé meredeken változik. Abban az esetben, ha kiválasztok egy nevezetes homogenitási küszöböt, pl.: 95 %, akkor azt tapasztalom, hogy a kis laboratóriumi tartály esetén érem el legkorábban (~ 60 min), míg a nagy laboratóriumi és ipari tartály esetén egy időben, de 20 perccel később.

## Eredmények és kiértékelés



**77. ábra: CFD szimulációk során kapott homogenitás görbék recirkulációs vizsgálatok esetén különböző tartály méretben**

A nagy laboratóriumi és ipari valamint kis és nagy laboratóriumi eredmények között tudok párhuzamot vonni. Ez azt mutatja, hogy méretnövelésnél nem választhatunk egy küszöb értéknél nagyobb arányt az adekvát adatok kinyerése érdekében.

## Összefoglalás

### Összefoglalás

Kutatásom célja volt a keverés tanulmányozása olyan rendszerben, ahol a homogenizálást külső cirkulációs szivattyúval érem el, továbbá a tartály tartalmát különböző sűrűségű folyadék rétegek töltik ki.

A dolgozatom irodalom fejezetében összefoglaltam a keverés legfontosabb elméleti és matematikai összefüggéseit. Jelentős hangsúlyt fektettem a keverés minőségére vonatkozó mutatószámok, módszerek bemutatására.

A kutatómunkámban megvizsgáltam a szívó és nyomó csonkok pozíciójának hatását a keverésre. Az eredményeimet tartózkodási idő eloszlás függvény szerint, tartózkodási idő várható értéke, hold-back, holt idő és holt térfogat értéke alapján értékeltem ki. A mérések eredményeül kapott eloszlás függvények alakja alapján pozitív egységugrás függvény betáplálás esetén a tartályban az áramlás a csonk pozíciótól függetlenül exponenciális jellegű, mely tökéletes üst áramlási képére jellemző. Negatív egységugrás betáplálás során, csonkpozíciótól függetlenül a válaszfüggvény konstans szakasszal kezdődik, mely cső jellegre utal. Ez alól kivételt képez, mikor a szívócsonk magasabban van, mint a nyomócsonk (poz\_2\_3), ez esetben pozitív ugrás függvény alkalmazásakor tapasztaltam holtidőt a mérés kezdetén. A szívócsonk magasságának növelésével illetve a nyomócsonk magasságának csökkentésével az elérhető homogenitás az adott mérési idő (13 h) alatt csökken az általam vizsgált tartályban. Megállapítottam, hogy a legelőnyösebb elrendezés az, mikor a szívócsonk a tartály fenekéhez a lehető legközelebb van, továbbá a nyomócsonk a folyadék felszín felett van pozícionálva. A vizsgált rendszerben a fajsúly különbségből fakadó felhajtóerők jelentős hatással vannak a kialakuló koncentrációkra. A koncentráció különbség vertikálisan domináns nem pedig horizontálisan. A mérési eredmények azt mutatják, hogy 13 órás keverési idő eltelte után is maradnak a rendszerben inhomogén folyadék elemek. A két mérési ponton (CH1 és CH2) rögzített vezetőképesség adatokból számított homogenitás értékek különbsége alátámasztja, hogy a kilépési csonkon mért koncentráció nem reprezentálja a teljes folyadék térfogatra jellemző értéket az általam vizsgált rendszerben.

Disszertációmban hangsúlyt fektettem a geometria, azaz a hengerelem számának hatásának tanulmányozására.  $1002.2 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálásakor a

## Összefoglalás

szegregáció nagyobb (ez cső jellegre utal), mint pozitív egységugrás vizsgálatokor. A hengerelem szám csökkentésével a szegregációs érték nő, azaz egyre inkább cső jellegű az áramlás a tartályon belül.  $1013.6 \text{ kg m}^{-3}$  sűrűségű oldat betáplálásakor a szegregáció üst jellegre utal. A hengerelem szám növelésével a tökéletesen kevert üstre jellemző kevertség erősödik.

A munkám során kitértem a méretnövelés hatásainak tanulmányozására is. Laboratóriumban végzett kísérletek során a betáplált oldat sűrűségétől függetlenül a nagylaboratóriumban gyorsabban megkaptam az elvárt oldat sűrűséget a kilépési csonkon, mint kis laboratóriumban. Ennek oka lehet, hogy a nagy laboratóriumi tartályban nagyobb a holt térfogat, mint a kis laboratóriumiban. A megnövekedett holt térfogat és, hogy a keverési folyamatok gyorsabban lejátszódnak ebben a méretben, a térfogat fajlagosra jutó betáplált kinetikus energia növekmény következménye lehet. Továbbá megjegyzendő, hogy a kis laboratóriumi méretben a gravitáció hatványozottan érvényesül a nagylaboratóriumi mérethez képest.

A speciális geometriájú tartályban végzett méréseim eredményei továbbá az egy hengerből álló tartály méretnövelésénél megállapítottak jó alapul szolgálnának több hengerelemű, ipari méretű tartályokban lezajló homogenizálási folyamatok leírására. A méretnövelés vizsgálatainál tapasztaltak alapján elmondható, hogy méretnövelésnél egy küszöb értéknél nagyobb arányt nem lehet választani az adekvát adatok kinyerése érdekében. Ahhoz hogy az ipari méretben történő homogenizálásról valósabb képet kapjunk, érdemes lenne nagyobb, fél-üzemi méretű kísérleti tartály tervezése és építése, majd abban kísérletek elvégzése és az ott kapott eredmények a kis és nagy laboratóriumi eredményekhez hasonlítása. A méretnövelésben a 21. században nagy segítséget jelent a CFD technika. A kísérletek során kapott eredmények leképezése CFD szimulátorban, majd a tartályok méretnövelése nagy segítséget jelent az ipari méretű (több  $100 \text{ m}^3$ -es) tartályokban lezajló folyamatok leírásában. Az elkészített modell validálásához azonban nélkülözhetetlennek tartom a kísérleti eredmények alkalmazását.

### Tézisek

1. A mérési eredményeim alapján megállapítottam a nyomó és szívócsonk pozíciójának hatását a tartózkodási idő eloszlás függvényre a vizsgált rendszerben.
  - 1.1 Pozitív egységugrás zavaró függvény esetén a szívócsonk pozíciótól függetlenül a válaszfüggvények exponenciális trenddel együtt futnak, holtidő nem jellemző.
  - 1.2 Negatív egységugrás válasz függvényei jelentős holtidővel rendelkeznek, mely az ideális cső reaktor válaszfüggvényre hasonlít. A szívócsonk magasságának növelésével
    - a tartózkodási idő várható értéke csökken,
    - holt idő csökken,
    - hold-back értékek nőnek,
    - holt térfogat értékek nőnek.
  - 1.3 A vizsgált rendszerben a fajsúly különbségből fakadó felhajtóerők jelentős hatással vannak a kialakuló koncentrációkra. A gravitáció meglete lassítja a kívánt homogenitás elérést. Gravitáció mentes esetben a tartózkodási idő várható értékek nagyobbak, mint gravitációs térben.
  - 1.4 A folyadék felszín fölötti és alatti betáplálási csonk pozíciók válaszfüggvényeiben jelentős eltérés van, a folyadék felszín alatti csonk pozíciók válasz függvényei jobban hasonlítanak egymásra.
    - Negatív egységugrás bemenet esetén a folyadék felszín feletti csonk pozíció kisebb holtidőt eredményez. A felszín alatti csonk pozíciók és a holt idők között lineáris összefüggés van.
    - Pozitív egységugrás esetén a folyadékfelszín alatti csonk pozíciónál a tartózkodási idő eloszlásfüggvények a mérés ideje alatt nem érték el az 1-et. A számított hold-back értékek a nyomócsonk magasságának csökkenésével csökkentek. Minél alacsonyabban van a betáplálási csonk, annál nagyobb a válaszfüggvény eltérése az exponenciális trendtől, illetve megjelenik a holtidő a vizsgálatok elején.

## Tézisek

- 1.5 Amennyiben a nyomócsonk a folyadék felszín alatt van, jelentős sűrűség különbségek maradnak a rendszerben.
- 1.6 Kombinált nyomócsonk pozíciók vizsgálatánál, ha a szívócsonk magasabban volt, mint a nyomócsonk, akkor a negatív egységugrás függvényre adott válasz exponenciális jellegű, míg a pozitív konstans szakasszal kezdődött.
2. Kutatómunkám során megvizsgáltam a nyomó és szívó csonkok pozíciójának hatását a 95 %-os homogenitás eléréséhez szükséges időre.
  - 2.1 Minél közelebb van a szívócsonk pozíciója a tartály fenekéhez, annál gyorsabban mérem a kimeneten a kívánt homogenitási fokot.
  - 2.2 A nyomócsonk magasságának csökkentésével a végső homogenitás csökken.
  - 2.3 Kombinált csonkpozíciók alkalmazásakor az elért homogenitás romlott.
  - 2.4 Megállapítottam, hogy homogenizálás céljából a leghatékonyabb csonk pozíció a vizsgált rendszerben az, amikor a nyomócsonk a folyadék felszíne fölött van és a szívócsonk a tartály fenekéhez közel.
3. A laboratóriumi mérések azt mutatják, hogy 13 órás keverési idő eltelte után is maradnak a rendszerben inhomogén folyadék térfogatok. A kilépési csonkon mért sűrűség bizonyítottan nem reprezentálja a teljes folyadék térfogatra jellemző értéket a tanulmányozott rendszerben.
  - 3.1 A vizsgált rendszerben a vertikális koncentráció különbségek nem szűnnek meg.
  - 3.2 A vizsgált tartály egészére jellemző átlagos kor közel egyenlő tömény- és híg oldat betáplálása esetén.
  - 3.3 A tanulmányozott tartály különböző helyein lévő molekulák élettartamának nagysága különbözik. Negatív egységugrás függvény esetén az elektródok környezetében a molekulák átlagos korában jelentős eltérés van, melynek oka a rendszerben megmaradó inhomogén folyadékelemek. Pozitív egységugrás esetén az elektródok környezetében a molekulák átlagos korában nincs jelentős eltérés, mely a tökéletes üst jelleget bizonyítja.

## Tézisek

4. Munkám során tanulmányoztam a tartály hengerelem számának hatását az eloszlásfüggvények alakjára.
  - 4.1 Pozitív egység ugrás esetén a geometriának nem volt hatása az eloszlás függvényekre továbbá a szegregáció értéke üst jellegre utalt. A hengerelem szám növekedésével
    - a tartózkodási idő várható értéke csökken,
    - holt térfogat nő.
  - 4.2 Negatív egységugrás esetén a hengerelemek számának növelésével
    - a holt idő nő,
    - a cső jelleg erősödik.
5. Munkám során vizsgáltam a méretnövelés hatásait laboratóriumi környezetben. Megállapítottam, hogy minél nagyobb a tartály térfogata, annál hamarabb homogenizálódik a tartály tartalma továbbá a szabad konvekciós hatások gyengülnek a vizsgált rendszerben.



### Thesis

1. Based on my experimental results, I determined the effect of the position of the inlet and outlet of the tank on the residence time distribution function.
  - 1.1. The response function curves of the positive step-input experiments run together with exponential trend and dead-time does not appear.
  - 1.2. The response function curves of the negative step-inputs have remarkable dead-time which characterizes the ideal plug flow reactor. By the height of the outlet of the tank:
    - the residence time decreases,
    - dead-time falls,
    - the rate of hold-back rises,
    - the value of the dead volume increases.
  - 1.3. In the examined system, the buoyancy force caused by the variance in specific gravity has a remarkable influence on the concentration in the tank. The gravitation slows down to reach the final homogeneity. In case of gravitation-free experiments, the values of residence time are smaller than in case of gravity.
    - Significant difference can be identified in the response functions of the inlet above and below the liquid level. The response functions of the inlet positions below the liquid level are supposed to be more equal. (In case of negative step-input experiment the dead time of the position above the liquid level is lower. There is a linear relationship between inlet positions under liquid level and dead time.
    - In case of positive-input measurement and the inlet position above the liquid level, the residence time distribution functions do not reach the value 1 over the experimental time. The calculated hold-back values decrease by the height of the inlet position. The lower the position inlet is the higher deviation from the exponential shape will appear, moreover, dead time occurs at the beginning of the experiment.
  - 1.4. When the inlet position is under the liquid level remarkable inhomogeneity remain in the investigated system.

## Thesis

- 1.5. During the examination of the combinations of inlet and outlet positions, when the outlet is higher than the inlet, the exponential trend is observed in case of negative-step input experiments and remarkable dead time appears at the positive-step input measurement.
2. In my work, I investigated the mixing time demand to reach the 95 % homogeneity.
  - 2.1. The lower position of the outlet causes smaller mixing time consumption.
  - 2.2. The value of the final homogeneity decreases by the height of the inlet position.
  - 2.3. Combinations of the inlet and outlet positions lead to decadency in homogeneity.
  - 2.4. I observed that the best inlet position was above and the finest outlet was close to the tank bottom to accomplish 95 % homogeneity in the investigated system.
3. Based on my experimental results, inhomogeneous liquid elements remain in the system in spite of 13 h mixing time. The concentration detected in the outlet stream does not represent the average concentration in the tank.
  - 3.1. In the investigated system the differences in the vertical concentrations do not disappear.
  - 3.2. The average age of the investigated system is almost equal when carrying out positive and negative input experiments.
  - 3.3. The age at different points of the examined tank are different. In case of negative-input experiments there are significant dissimilarities in ages at points which are caused by the remained inhomogeneous fluid elements. In case of positive-input measurements the ages are close to each other at varied points due to the perfect mixing tank property.
4. In my work, I also recognized the influence of the numbers of the cylinders on the shape of residence time distribution function curve.
  - 4.1. In case of positive-input measurements the influence of the shape of the geometry is not remarkable which is caused by the perfect mixing tank feature. By rising the number of cylinders

## **Thesis**

- the residence time distribution decreases,
- the value of dead volume increases.

4.2. In case of negative-input experiments by improving the number of cylinders

- the dead time increases,
- the plug-flow trend becomes more dominant.

5. In my research, I investigated the influence of the scale-up in laboratory. I observed that bigger tank volume consumes shorter mixing time, in addition, the effect of natural convection decreases in the examined system.

### Publikációs jegyzék

#### Folyóiratban megjelent cikkek

#### PhD dolgozat alapját képező közlemények

1. Janka Bobek, Attila Egedy, Dóra Rippel-Pethő, 2019, Laboratory and Computational Fluid Dynamics Investigation of Homogenization in a Tank Stirred by External Pump, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, online, doi: 10.3311/PPch.14683 IF: 1.450
2. Bálint Levente Tarcsay, Attila Egedy, Janka Bobek, Dóra Rippel-Pethő, 2019, Investigation of Mixing in Tanks of a Special Geometry, *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 47, pp. 63–70. doi: 10.33927/hjic-2019-21
3. Janka Bobek, Dóra Rippel-Pethő, Róbert Bocsi, Bálint Tarcsay, 2019, Effect of Geometry on Homogenization of Two Layers Stratified Liquid, *Chemical Engineering Transactions*, 76, pp. 169-174. doi:10.3303/CET1976029
4. Janka Bobek, Dóra Rippel-Pethő, Róbert Bocsi, 2018, Effect of outlet position on homogeneity of two layer stratified liquid, *Chemical Engineering Transactions*, 70, pp. 1195-1200, doi:10.3303/CET1870200

#### PhD dolgozat tématerületét nem érintő egyéb közlemények száma

5. Bobek Janka, Rippelné Dr. Pethő Dóra, 2017, Levendula extrakciója nagy nyomású szén- dioxiddal, XXII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, *Műszaki tudományos közlemények 7.*, pp. 107-110. doi: 10.33895/mtk-2017.07.19
6. Bocsi Róbert, Rippelné Pethő Dóra, Horváth Géza, Hodai Zoltán, Bobek Janka, 2017, Üzemanyag biokomponensek előállításához természet mikroalgák feldolgozásakor keletkező mellékáramok hasznosítási lehetőségei, XXII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, *Műszaki tudományos közlemények 7.*, pp. 111-114. doi: 10.33895/mtk-2017.07.20

## Publikációs jegyzék

7. É. Molnár, T. Varga, D. Rippel-Pethő, J. Bobek, G. Horváth, 2017, Optimization of the sodium hydroxide assisted hydrogen sulfide selective removal from natural gas, *Chemical Engineering Communications*, 204(8), pp. 974-981. doi: 10.1080/00986445.2017.1328679 IF: 1.402
8. É.,Molnár, D. Rippel-Pethő, G. Horváth, J. Bobek, R. Bocsi, H. Hodai, 2017, Removal of hydrogen sulphide content from biogas by atomizing of alkali solution. *Studia Universitatis Babes-Bolyai Chemia*, 62(3), pp. 265–272. doi: 10.24193/subbchem.2017.3.22 IF:0.305
9. É.,Molnár, D. Rippel-Pethő, G. Horváth, J. Bobek, R. Bocsi, H. Hodai, 2017, Study of selective hydrogen sulfide absorption by comparing two different alkali absorbents by using atomization method. *Studia Universitatis Babes-Bolyai Chemia*, 62(3), pp. 273–282. doi:10.24193/subbchem.2017.3.23 IF:0.305
10. Bobek Janka, Molnár Éva, Rippelné Pethő Dóra, Bocsi Róbert, 2016, Savas karakterű gázok szelektív kén-hidrogén-mentesítése, XXI. Fialatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Műszaki tudományos közlemények 5.,pp. 109-112.
11. Molnár Éva, Rippelné Pethő Dóra, Horváth Géza, Bocsi Róbert, Bobek Janka, 2016, Nátrium-hidroxid abszorbenssel végzett kénhidrogén-mentesítés gazdaságosabbá tételének vizsgálata, XXI. Fialatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Műszaki tudományos közlemények 5.,pp. 285-288.
12. J. Bobek, D. Rippel-Pethő, É. Molnár, R. Bocsi, 2016, Selective hydrogen sulphide removal from acid gas by alkali chemisorption in a jet reactor, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 44(1), pp. 51-54. doi: 10.1515/hjic-2016-0006
13. É. Molnár, D. Rippel-Pethő, G. Horváth, Z. Hodai, R. Bocsi, J. Bobek, 2016, Benefits of Jet Reactor Application in Alkaline Gas Purification, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 60(2), pp. 74-77. doi:10.3311/PPch.8261 IF: 0.800

## Publikációs jegyzék

14. Bobek Janka, Kovács Zsófia, Dr. Zsilák Zoltán (2013): On-line és laboratóriumi módszerek alkalmazása felszíni vizek minőségének vizsgálatára, Kiadó Eötvös József Főiskola, Baja 2013, CD kiadvány, pp. 167 -179. ISBN 978-615-5429-00-2
15. J. Bobek, Zs. Kovács, Z. Zsilák, 2014, Application of on line and laboratory methods for the investigation of surface waters, Hungarian Journal of Industrial Chemistry, 42(1), pp. 13-18. ISSN: 2450-5102

## Előadások

16. Tarcsay Bálint Levente, Bobek-Nagy Janka, Dr. Egedy Attila, 2019, Speciális geometriájú berendezés áramlási viszonyainak vizsgálata, Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia, Műszaki Tudományi Szekció, 2019. november 27., Veszprém, Magyarország
17. Tarcsay Bálint Levente, Rippelné Dr. Pethő Dóra, Bobek Janka, 2019, Homogenizálódás és áramlás vizsgálata recirkulációs keverőtartályokban, XVI. Jedlik Ányos Szakmai Napok, 2019. április 12., Veszprém, Magyarország
18. Tarcsay Bálint Levente, Bobek Janka, Dr. Egedy Attila, Rippelné Dr. Pethő Dóra, 2019, Homogenizálódás vizsgálata speciális geometriájú tartályokban, Műszaki Kémiai Napok 2019, 2019. április 16-18., Veszprém, Magyarország
19. Janka Bobek, Dóra Rippel-Pethő, Róbert Bocsi, 2018, Effect of outlet position on homogeneity of two layer stratified liquid, 21st Conference on Process Integration for Energy Saving and Pollution Reduction - PRES 2018, 25-29 August 2018, Prague, Czech Republic
20. Tarcsay Bálint Levente, Rippelné Dr. Pethő Dóra, Bobek Janka, 2018, Homogenizálódás és áramlás vizsgálata recirkulációs keverőtartályokban, Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia, Kémiai és Vegyipari Szekció, 2018. november 21., Veszprém, Magyarország
21. Bobek Janka, Rippelné Dr. Pethő Dóra, 2017, Folyadékok Homogenizálása Speciális Kialakítású Folyadéktartályokban, PhD

## **Publikációs jegyzék**

hallgatók anyagtudományi napja XVII., 2017. december 4., Veszprém,  
Magyarország

22. Janka Bobek, Dóra Rippel-Pethő, 2017, Examination of Mixing Effects in Liquid Tank, 44<sup>th</sup> International Conference of the Slovak Society of Chemical Engineering, 22-26. May 2017, Demänovská dolina, Slovakia
23. Bobek Janka, Rippelné Dr. Pethő Dóra, 2017, Homogenitás Vizsgálata Folyadéktartályokban, Műszaki Kémiai Napok, 2017. április 25-27., Veszprém, Magyarország

## **Poszterek**

24. Janka Bobek, Dóra Rippel-Petho, Róbert Bocsi, Bálint Tarcsay, 2019, Effect of Geometry on Homogenization of Two Layers Stratified Liquid, 22nd Conference on Process Integration for Energy Saving and Pollution Reduction - PRES'19, 20-23 September 2019, Crete, Greece - poster
25. Janka Bobek, Dóra Rippel-Pethő, Róbert Bocsi, 2018, Effect of Inlet Position on Mixing of Miscible Liquids in a Cylinder Tank, 16th European Conference on Mixing, 8-13. September 2018, Toulouse, France - poster

### Irodalom jegyzék

- [1] Argyelán, J., 2009. Transzportfolyamatok. Pannon Egyetemi Kiadó, Veszprém. ISBN: 978 963 9696 79 2
- [2] Rao, S.S., 2011. The Finite Element Method in Engineering (Fifth Edition), Chapter 17-Basic Equations of Fluid Mechanics. 549-569.  
doi: 10.1016/B978-1-85617-661-3.00017-9
- [3] Lajos, T., 2004. Az áramlástan alapjai. Műegyetemi Kiadó ISBN 963 420 798 7
- [4] Pritchard, P.J., 2011. Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics, 8th edition. John Wiley & Sons, INC., United States of America. ISBN:13 9780470547557
- [5] Rubenstein, D., Yin, W., Frame, M., , 2015. Biofluid Mechanics, An Introduction to Fluid Mechanics, Macrocirculation, and Microcirculation, Chapter 2 - Fundamentals of Fluid Mechanics. Biomedical Engineering, Academic Press, Elseiver Inc, 15-62. doi: 10.1016/B978-0-12-800944-4.00002-0
- [6] Welty, J.R., Wicks, C. E., W., Robert E. W., Rorrer. G.L, 2007. Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer (5th Edition). John Wiley & Sons, INC., United States of America. ISBN: 13 978-0470128688
- [7] Szolcsányi, P., 1972. Transzportfolyamatok. Tankönyvkiadó, Budapest.
- [8] Brodkey, R.S., 1995. The Phenomena of Fluid Motions. Dover Publication. ISBN: 10: 0486686051 ISBN:13: 978-0486686059
- [9] Mory, M., 2011. Fluid Mechanics for Chemical Engineering, 1st edition. ISTE Ltd, John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-1-84821-281-7
- [10] Fejes, 1970. Ipari keverőberendezések. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. ETO: 621.646.76
- [11] Berk, Z., 2018. Food Process Engineering and Technology 3rd edition. Academic Press, Elseiver Inc. ISBN: 9778-0-12-812018-7
- [12] Paul, E.L., Atiemo-Obeng, V.A., Kresta, S.M., 2004. Handbook of industrial mixing, Science and practice. John Wiley & Sons, INC., United States of America ISBN: 0-471-26919-0
- [13] Thakur, R.K., Vial, Ch., Nigam, K.D.P., Nauman, E.B., Djelveh, G., , 2003. Static mixers in the prosecc industries - A review. Chemical Engineering Research and Design, 81, 787-826. doi: 10.1205/026387603322302968
- [14] Haddadi, M.M., Hosseini, S.H., Rashtchian,D.,Olazar, M., 2019. Comparative analysis of different static mixers performance by CFD technique: An innovative mixer. Chinese Journal of Chemical Engineering. doi: 10.1016/j.cjche.2019.09.004



## Irodalom jegyzék

- [15] Li, S., Chen, G., Sun, L., 2011. Selective hydrogenation of 3,3-dimethylbutanoyl chloride to 3,3-dimethylbutyraldehyde with silica supported Pd nanoparticle catalyst. *Catalysis Communications*, 12, 813-816. doi: 10.1016/j.catcom.2011.01.025
- [16] Xing, Y., Xu, M., Gui, X., Cao, Y., Rudolph, M., Butt, H.J., Kappl, M., 2019. The role of surface forces in mineral flotation. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 44, 143-152. doi: 10.1016/j.cocis.2019.11.005
- [17] Szűcs, E., 1967. A hasonlóságelmélet alapjai. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. ETO:161.225.22
- [18] Prakash, R., Majumder, S.K., Singh, A., 2018. Flotation technique: Its mechanisms and design parameters. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 127, 249-270. doi: 10.1016/j.cep.2018.03.029
- [19] Zhang, H.L., Baeyens, J., Tan, T.W., 2012. The bubble-induced mixing in starch-to-ethanol fermenters. *Chemical Engineering Research and Design*, 90, 2122–2128. doi: 10.1016/j.cherd.2012.05.003
- [20] Schmidt, D., Velten, K., 2016. Numerical simulation of bubble flowhomogenization in industrial scale winefermentations. *Food and Bioproducts Processing*, 100, 102-117. doi: 10.1016/j.fbp.2016.06.008
- [21] Wei, P., Mudde, R.F., Uijttewaall, W., Spanjers, H., van Lier, J.B., de Kreuk, M., 2019. Characterising the two-phase flow and mixing performance in a gasmixedanaerobic digester: Importance for scaled-up applications. *Water Research*, 149, 86-97. doi: 10.1016/j.watres.2018.10.077
- [22] Prada, I.D.C., Rivera-Tinoco, R., Bouallou, C., 2020. Biogas industry: Novel acid gas removaltechnology using a superacid solvent. Processdesign, unit specification and feasibility studycompared with other existing technologies. *Chemical Engineering Research and Design*, 154, 121-231. doi: 10.1016/j.cherd.2019.12.007
- [23] Vorobev, A., 2014. Dissolution dynamics of miscible liquid/liquid interfaces. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 19, 300–308. doi: 10.1016/j.cocis.2014.02.004
- [24] Sullivan, G.D., List, J.E., 1993. An experimental investigation of vertical mixing in two-layer density-stratified shear flows. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 19, 147-174.  
doi: 10.1016/0377-0265(93)90035-6
- [25] Sow, A., Lee, B.J., Pérez, F.E.H., Im, H.G., 2019. Detonation onset in a thermally stratified constant volume reactor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37, 3529–3536. doi: 10.1016/j.proci.2018.08.043
- [26] Farooq, A., Shafaghat, H., Jae, J., Jung, S-C., Park, Y-K., , 2019. Enhanced stability of bio-oil and diesel fuel emulsion using Span 80 and Tween 60 emulsifiers. *Journal of Environmental Management*, 231, 694-700. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.098
- [27] Degawa, T., Fukue, S., Uchiyama, T., Ishikawa, A., Motoyama, K., , 2017. Behavior of a Jet Issuing Diagonally Upward into Two-Layer Density-

## Irodalom jegyzék

- Stratified Fluid in a Cylindrical Tank. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 5, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*. doi: 10.4236/jfcmv.2017.53004
- [28] He, G., Lin, M., Wang, B., Liang, Y., Huang, Q., 2018. Experimental and numerical research on the axial and radial concentration distribution feature of miscible fluid interfacial mixing process in products pipeline for industrial applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 728–745. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.080
- [29] Grenville, R.K., Giacomelli, J.J., VanOmmeren, G.J., Hastings, C.F., Walters, M.J., 2018. Blending in above ground storage tanks with side-entering agitators. *Chemical Engineering Research and Design*, 137, 395–402. doi: 10.1016/j.cherd.2018.07.017
- [30] Derksen, J.J., 2011. Blending of miscible liquids with different densities starting from a stratified state. *Computers & Fluids*, 50, 35-45. doi: 10.1016/j.compfluid.2011.06.013
- [31] Grenville, R.K., Tilton, J.N., 2011. Jet mixing in tall tanks: Comparison of methods for predicting blend times. *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 2501-2506. doi: 10.1016/j.cherd.2011.05.014
- [32] Shakouchi, S., Fukue, S., Uchiyama, T., 2015. Investigation of the Behavior of a Jet Issued into Two-Layer Density-Stratified Fluid. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 3, 1-9. doi: 10.4236/jfcmv.2015.31001
- [33] Pozrikidis, C., 2019. *Transport processes primer*. Springer Science and Business Media LLC. . doi: 10.1007/978-1-4939-9909-5
- [34] Rodgers, T.L., Gangolf, L., Vannier, C., Parriaud, M., Cooke, M., 2011. Mixing times for process vessels with aspect ratios greater than one. *Mixing times for process vessels with aspect ratios greater than one*, 66, 2935-2944. doi: 10.1016/j.ces.2011.03.036
- [35] Huo, J., Lu, Y., Xia, L., Chen, D., 2020. Structural characterization and anticomplement activities of three acidic homogeneous polysaccharides from *Artemisia annua*. *Journal of Ethnopharmacology*, 247, 112281. doi: 10.1016/j.jep.2019.112281
- [36] Kazemzadeh, A., Ein-Mozaffari, F., Lohi, A., 2019. Effect of impeller type on mixing of highly concentrated slurries of large particles. *Particuology*. doi: 10.1016/j.partic.2019.07.004
- [37] Naeeni, S., K., Pakazd, L., 2019. Experimental and numerical investigation on mixing of dilute oil in water dispersions in a stirred tank. *Chemical Engineering Research and Design*, 147, 493-509. doi: 10.1016/j.cherd.2019.05.024
- [38] Naeeni, S., K., Pakazd, L., 2019. Droplet size distribution and mixing hydrodynamics in a liquid–liquid stirred tank by CFD modeling. *International Journal of Multiphase Flow*, 120, 103100. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103100

## Irodalom jegyzék

- [39] Aydin, Ö., Yapici, S., 2018. A novel method for the measurement of mixing time: A new application of electrochemical limiting diffusion current technique. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 99, 242-250.  
doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.08.002
- [40] Zun, I., Perpar, M., Gregorc, J., Hayashi, K., Tomiyama, A., , 2012. Mixing of thermally stratified water layer by a free rising wobbling air bubble. *Chemical Engineering Science*, 72, 155-171. doi: 10.1016/j.ces.2011.12.024
- [41] Ascanio, G., 2015. Mixing time in stirred vessels: A review of experimental techniques. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23, 1065–1076.  
doi: 10.1016/j.cjche.2014.10.022
- [42] Meng, J., Tabosa, E., Xie, W., Runge, K., Bradshaw, D., Manlapig, E., , 2016. A review of turbulence measurement techniques for flotation. *Minerals Engineering*, 95, 79-95. doi: 10.1016/j.mineng.2016.06.007
- [43] Gvozdic', B., Dung, O.Y., Alméras, E., van Gils, D.P.M., Lohse, D.,, 2019. Experimental investigation of heat transport in inhomogeneous bubbly flow. *Chemical Engineering Science*, 198, 260-267.  
doi: 10.1016/j.ces.2018.09.040
- [44] Kamrak, J., Kongsombut, B., Grehan, G., Saengkaew, S., Kim, K.S., Charinpanitkul, T., , 2009. Mechanistic study on spraying of blended biodiesel using phase Doppler anemometry. *biomass and bioenergy*, 33, 1452 – 1457. doi: 10.1016/j.biombioe.2009.06.011
- [45] Paglianti, A., Montante, G.,, 2020. Simultaneous measurements of liquid velocity and tracer concentration in a continuous flow stirred tank. *Chemical Engineering Science*, 115495. doi: 10.1016/j.ces.2020.115495
- [46] Huang, F., Wang, D., Li, Z., Gao, Z., Derksen, J.J.,, 2019. Mixing process of two miscible fluids in a lid-driven cavity. *Chemical Engineering Journal*, 362, 229–242. doi: 10.1016/j.cej.2019.01.024
- [47] Mihailova, O., Lim, V., McCarthy, M.J., McCarthy, K.L., Bakalis, S., , 2015. Laminar mixing in a SMX static mixer evaluated by positron emission particle tracking (PEPT) and magnetic resonance imaging (MRI). *Chemical Engineering Science*, 137, 1014-1023. doi: 10.1016/j.ces.2015.07.015
- [48] Harrison, S.T.L., Kotsiopoulos, A., Stevenson, R., Cilliers, J.J., , 2020. Mixing indices allow scale-up of stirred tank slurry reactor conditions for equivalent homogeneity. *Chemical Engineering Research and Design*, 153, 865–874. doi: 10.1016/j.cherd.2019.10.049
- [49] Ascanio, G., Foucault, S., Tanguy, P.A., 2004. Time-periodic mixing of shear-thinning fluids. *Chemical Engineering Research and Design*, 82, 1199-1203. doi: 10.1205/cerd.82.9.1199.44155
- [50] Horváth, G., 2011. Környezetmérnöki tudástár, 6. kötet, Környezetvédelmi műszaki technológiák. Pannon Egyetem. ISBN: 978-615-5044-31-1

## Irodalom jegyzék

- [51] Danckwerts, P.V., 1953. Continuous flow systems: Distribution of residence times. *Chemical Engineering Science*, 2. doi: 10.1016/0009-2509(53)80001-1
- [52] Solt, G., 1993. Valószínűség-számítás, példatár, Bolyai-könyvek. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 6. kiadás. doi: ISBN: 963 10 9781 1
- [53] Clark, M.M., 2009. *Transport Modeling for Environmental Engineers and Scientists*. John Wiley & Sons, INC., United States of America. ISBN: 978-0-470-26072-2
- [54] Levenspiel, O., 1999. *Chemical reaction engineering*. John Wiley & Sons, INC., United States of America, 3rd edition. ISBN: 0-471-25424-X
- [55] Baowan, D., Cox, B.J., Hilder, T., A., Hill, J.M., Thamwattana, N., , 2017. *Modelling and Mechanics of Carbon-Based Nanostructured Materials*, Chapter 2-Modelling and Mechanics of Carbon-Based Nanostructured Materials. William Andrew Applied Science Publishers.  
doi: 10.1016/B978-0-12-812463-5.00002-9
- [56] Zwietering, T.N., 1959. The degree of mixing in continous flow systems. *Chemical Engineering Science* 11, 1-15. doi: 10.1016/0009-2509(59)80068-3
- [57] Lukács, O., 2002. *Mate,matikai statisztika, példatár, Bolyai-könyvek*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 4. változatlan utánnomtatás. ISBN: 963 16 3036 6
- [58] Liu, M., Tilton, J. N., 2010. Spatial Distributions of Mean Age and Higher Moments in Steady Continuous Flows. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 56, 2561-2572. doi: 10.1002/aic.12151
- [59] Danckwerts, P.V., 1958. The effect of incomplete mixing on homogeneous reactions. *Chemical Engineering Science*, 8, 93-102. doi: 10.1016/0009-2509(58)80040-8
- [60] Schwartz, L.M., 1963. Measurement of the degree of mixing of fluids. *Chemical Engineering Science*, 18, 223-225. doi: 10.1016/0009-2509(63)87002-5
- [61] Liu, M., 2011. A method for computing the degree of mixing in steady continuous flow systems. *ChemicalEngineeringScience*, 66, 3045–3048. doi: 10.1016/j.ces.2011.03.049
- [62] Toro, E.F., 1999. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics - A Practical Introduction*, 2th edition. 2th edition. doi: 2th edition
- [63] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Zhu, J.Z, 2013. *The finite element method: its basis and fundamentals*, 7th edition. Elseiver Ltd. doi: 10.1016/C2009-0-24909-9
- [64] Solin, P., Segeth, K., Dolezel I., 2003. *Higher-Order Finite Element Methods*, 1st edition. Chapman and Hall/CRC. ISBN: 9781584884385
- [65] Chung, T.J., 2010. *Computational fluid dynamics*. Cambridge University Press doi: 10.1017/CBO9780511606205

## Irodalom jegyzék

- [66] Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, 2nd edition. Pearson Prentice Hall. ISBN: 978-0-13-127498-3
- [67] Russ, D.C., Berson, R.E., , 2016. Mean age theory in multi phase systems. Chemical Engineering Science, 141, 1-7. doi: 10.1016/j.ces.2015.10.030
- [68] Liu, M., 2012. Age distribution and the degree of mixing in continuous flow stirred tank reactors. Chemical Engineering Science, 69, 382–393. doi: 10.1016/j.ces.2011.10.062
- [69] Liu, D., Tang, W., Wang, J., Xue, H., Wang, K., , 2016. Comparison of laminar model, RANS, LES and VLES for simulation of liquid sloshing. Applied Ocean Research, 59, 638-649. doi: 10.1016/j.apor.2016.07.012
- [70] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Nithiarasu, P., , 2014. The Finite Element Method for Fluid Dynamics, Chapter 8 - Turbulent Flows. Elsevier Ltd, 3, 283-309. doi: 10.1016/B978-1-85617-635-4.00008-X
- [71] Launder, B.E., Spalding. D. B., , 1974. The numerical computation of turbulent flows Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269-289. doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2
- [72] Perry, R.H., Green, D.W.,, 1999. Perry's Chemical Engineers' Handbook, Section 6, Fluid and Particle Dynamics. The McGraw-Hill Companies, Inc., 6-1-6-54. ISBN: 0-07-049841-5
- [73] Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N., , 2006. Transport Phenomena, 2nd edition, Part I. Momentum transport. John Wiley & Sons, INC., United States of America, 15-263. ISBN: 978-0-470-11539-8
- [74] Ballea, A., Pushpavanam, S., Deshpande, A.,, 2007. Experimental and numerical investigation of liquid circulation induced by a bubble plume in a baffled tank. Chemical Engineering Science, 62, 4689 – 4704. doi: 10.1016/j.ces.2007.05.023
- [75] Németh B., 1971. Kémiai táblázatok, 139. táblázat: Nátrium-tetraborát oldat sűrűsége. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.

## **Köszönetnyilvánítás**

### **Köszönetnyilvánítás**

Köszönetet szeretnék mondani témavezetőmnek, Rippelné Dr. Pethő Dóra docens asszonynak dolgozatom összeállításában nyújtott segítségével és szakmai támogatásáért.

Köszönettel tartozom Dr. Argyelán János nyugalmazott egyetemi docens úrnak, aki szakmai tapasztalatával segítette kutatómunkámat.

Szeretném köszönetemet kifejezni Dr. Bócsi Róbert, adjunktus úrnak a laboratóriumi kísérletekben nyújtott támogatásáért.

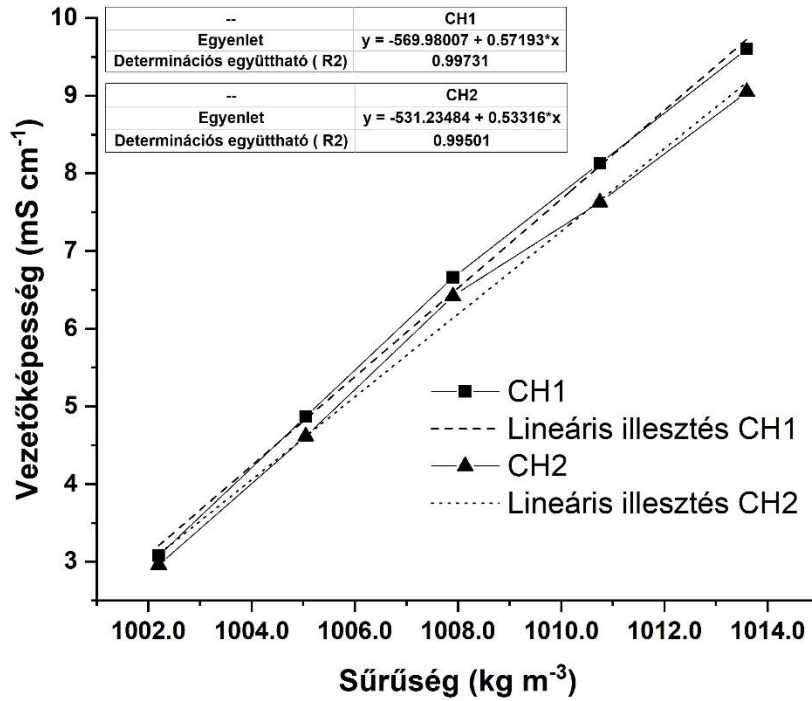
A dolgozat szimulációs fejezetei nem valósulhattak volna meg Dr. Egedy Attila, egyetemi docens úr segítségével nélkül.

Köszönettel tartozom Németh Marcell és Tarcsay Bálint Levente diplomázó hallgatóknak laboratóriumi munkájukért.

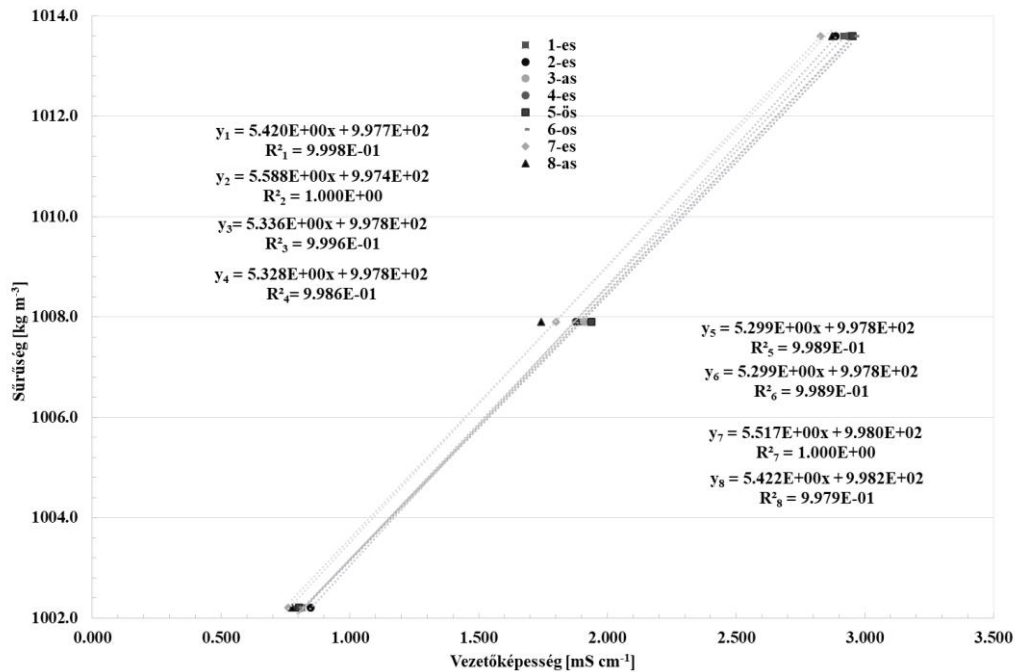
A PEREGRINATIO I. és az Ipar a veszprémi mérnökképzésért Alapítványok támogatása nélkül ez a munka nem valósulhatott volna meg.

Melléklet

1. Melléklet: Két-csatornás vezetőképesség-mérő kalibrációja



2. Melléklet: Nyolc-csatornás vezetőképesség-mérő kalibrációja



## Melléklet

### 3. Melléklet: A visszakeveredés koncentráció számításához használt UDF fájl

```
#include "udf.h"
#define TH 4.0
#define TIN 29.16
#define NODE 43.0
DEFINE_PROFILE(Temp_outlet,t,i)
{
    face_t f;
    real time;
    real current_time;
    FILE *ap;
    double sum,atlag;
    int k,j;
    int a;
    float b,c,d,e,g;
    char filename1[26],filename[30],szam[15],utvonal[100],utvonal1[100];
    char h[20],n[10];
    filename[0]='F';
    filename[1]='F';
    filename[2]='F';
    filename[3]='-';
    filename[4]='S';
    filename[5]='e';
    filename[6]='t';
    filename[7]='u';
    filename[8]='p';
    filename[9]='-';
    filename[10]='O';
    filename[11]='u';
    filename[12]='t';
    filename[13]='p';
```



## Melléklet

```
filename[14]='u';
filename[15]='t';
filename[16]='-';
filename[17]='\0';
szam[0]='0';
szam[1]='1';
szam[2]='2';
szam[3]='3';
szam[4]='4';
szam[5]='5';
szam[6]='6';
szam[7]='7';
szam[8]='8';
szam[9]='9';
szam[10]='\0';
//Útvonal megadása:
//D:\test\test2_files\dp0\FFF\
utvonal[0]='D';
utvonal[1]=':';
utvonal[2]='\\';
utvonal[3]='t';
utvonal[4]='e';
utvonal[5]='s';
utvonal[6]='t';
utvonal[7]='\\';
utvonal[8]='t';
utvonal[9]='e';
utvonal[10]='s';
utvonal[11]='t';
utvonal[12]='2';
utvonal[13]='_';
utvonal[14]='f';
```

## Melléklet

```
utvonal[15]='i';
utvonal[16]='l';
utvonal[17]='e';
utvonal[18]='s';
utvonal[19]='\\';
utvonal[20]='d';
utvonal[21]='p';
utvonal[22]='0';
utvonal[23]='\\';
utvonal[24]='F';
utvonal[25]='F';
utvonal[26]='F';
utvonal[27]='\\';
utvonal[28]='\0';
time=CURRENT_TIMESTEP;
current_time=CURRENT_TIME;
printf("Idolepes: %d\n",(int)(CURRENT_TIME/CURRENT_TIMESTEP));
j=(int)(CURRENT_TIME/CURRENT_TIMESTEP)-
(int)(TH/CURRENT_TIMESTEP);
if(j>0){
//printf("j ertek: %d\n",j);
filename1[0]='\0';
utvonal1[0]='\0';
strcat(filename1,filename);
if(j<10){
n[0]=szam[0];
n[1]=szam[0];
n[2]=szam[0];
n[3]=szam[j];
strcat(filename1,n);
printf("%s\n",filename1);
}
}
```

## Melléklet

```
else if(j<100){
    n[0]=szam[0];
    n[1]=szam[0];
    n[2]=szam[(j-j%10)/10];
    n[3]=szam[(j%10)];
    strcat(filename1,n);
    //printf("%s\n",filename1);
}

else if(j<1000)
{
    n[0]=szam[0];
    n[1]=szam[(j-j%100)/100];
    n[2]=szam[(j%100-(j%100)%10)/10];
    n[3]=szam[(j%10)];
    strcat(filename1,n);
    //printf("%s\n",filename1);
}
else
{
    n[0]=szam[(j-j%1000)/1000];
    n[1]=szam[(j%1000-(j%1000)%100)/100];
    n[2]=szam[(j%100-(j%100)%10)/10];
    n[3]=szam[(j%10)];
    strcat(filename1,n);
    //printf("%s\n",filename1);

}
//printf("%s\n",filename1);
//printf("utvonal1: %s\n",utvonal1);
//printf("utvonal: %s\n",utvonal);
```

## Melléklet

```
//printf("filename1: %s\n",filename1);
strcat(utvonal1,utvonal);
//printf("fuz1_utvonal1 %s\n",utvonal1);
strcat(utvonal1,filename1);
//printf("fuz2_utvonal1 %s\n",utvonal1);
ap=fopen(utvonal1,"r");
if(ap>0)
    printf("sikerült beolvasni: %s\n",filename1);
else
    printf("nem sikerült beolvasni: %d\n",filename1);

fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);

sum=0.0;
for(k=1;k<=NODE;k++){
    fscanf(ap,"%d %f %f %f %f %f",&a,&b,&c,&d,&e,&g);
    //printf("atlag: %f\n",e);
    sum+=e;
}

atlag=sum/NODE;
```

## Melléklet

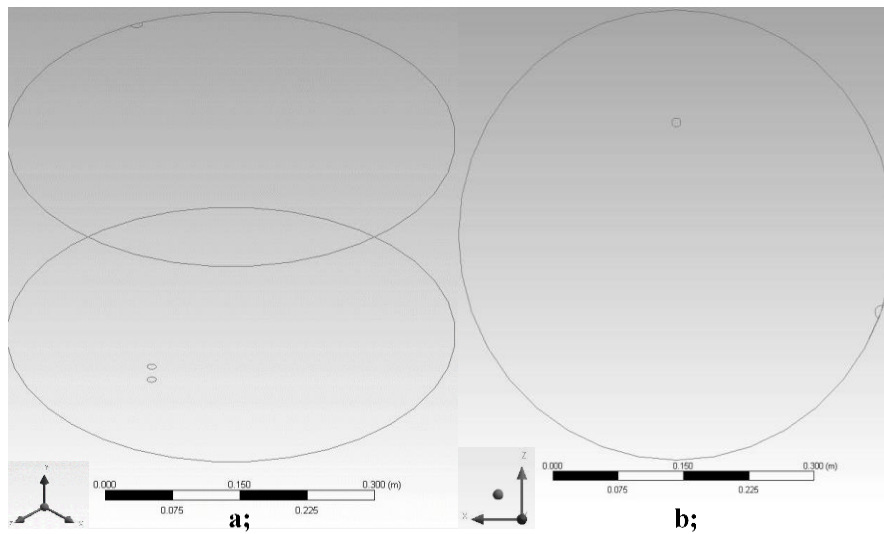
```
printf("atlag: %f\n",atlag);
fclose(ap);
}

if (current_time >TH){
    //printf("T_megad 300\n");
    begin_f_loop(f,t)
        F_PROFILE(f,t,i)=atlag;
    end_f_loop(f,t)
}
else{
    //printf("T_megad 288\n");
    begin_f_loop(f,t)
        F_PROFILE(f,t,i)=TIN;
    end_f_loop(f,t)
}

}
```

## Melléklet

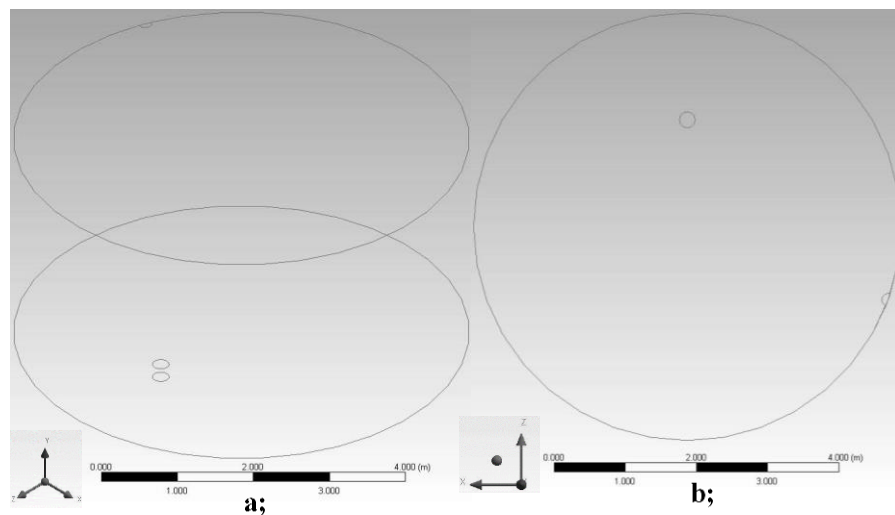
4. Melléklet: Nagy laboratóriumi tartály CFD szimulátorban képzett geometriája a; iso nézet b; felül nézet



5. Melléklet: Nagy laboratóriumi tartály hálófüggetlenségi vizsgálatának eredménye

Elemsszám (db)	44 718	93 021	261 900
Csomópontok száma (db)	8 382	17 223	47 054
Hiba (%)	11.9	7.7	3.6
Gépidő (h)	26.2	29.0	69.3

6. Melléklet: Ipari tartály CFD szimulátorban képzett geometriája a; iso nézet b; felül nézet



## Melléklet

### 7. Melléklet: Ipari tartály hálófüggetlenségi vizsgálata

Elemszám (db)	33 039	88 301	249 881
Csomópontok száma (db)	6 306	16 415	44 913
Hiba (%)	1.69	1.50	1.87
Gépidő (h)	24.6	38.0	60.0

### 8. Melléklet: A betáplálási és a visszakeveredés koncentráció számításához használt UDF fájl

```
#include "udf.h"
#define TH 1.0
#define TH2 2.0
#define TIN 61.0
#define TIN2 61.0
#define NODE 46
DEFINE_PROFILE(Temp_inlet,t,i)
{
face_t f;
real time;
real current_time;
FILE *ap;
double sum,atlag;
int k,j;
int a;
float b,c,d,e,g;
char filename1[26],filename[30],szam[15],utvonal[100],utvonal1[100];
char h[20],n[10];
filename[0]='F';
filename[1]='F';
filename[2]='F';
filename[3]='-';
filename[4]='S';
filename[5]='e';
```

## Melléklet

```
filename[6]='t';
filename[7]='u';
filename[8]='p';
filename[9]='-';
filename[10]='O';
filename[11]='u';
filename[12]='t';
filename[13]='p';
filename[14]='u';
filename[15]='t';
filename[16]='-';
filename[17]='\0';
szam[0]='0';
szam[1]='1';
szam[2]='2';
szam[3]='3';
szam[4]='4';
szam[5]='5';
szam[6]='6';
szam[7]='7';
szam[8]='8';
szam[9]='9';
szam[10]='\0';
//Útvonal megadása:
//D:\test\test2_files\dp0\FFF\
utvonal[0]='D';
utvonal[1]=':';
utvonal[2]='\\';
utvonal[3]='t';
utvonal[4]='e';
utvonal[5]='s';
utvonal[6]='t';
```



## Melléklet

```
utvonal[7]='\';
utvonal[8]='t';
utvonal[9]='e';
utvonal[10]='s';
utvonal[11]='t';
utvonal[12]='2';
utvonal[13]='_';
utvonal[14]='f';
utvonal[15]='i';
utvonal[16]='l';
utvonal[17]='e';
utvonal[18]='s';
utvonal[19]='\';
utvonal[20]='d';
utvonal[21]='p';
utvonal[22]='0';
utvonal[23]='\';
utvonal[24]='F';
utvonal[25]='F';
utvonal[26]='F';
utvonal[27]='\';
utvonal[28]='\0';
time=CURRENT_TIMESTEP;
current_time=CURRENT_TIME;
printf("Idolepes: %d\n",(int)(CURRENT_TIME/CURRENT_TIMESTEP));
j=(int)(CURRENT_TIME/CURRENT_TIMESTEP)-
(int)(TH/CURRENT_TIMESTEP);
if(j>0){
//printf("j ertek: %d\n",j);
filename1[0]='\0';
utvonal1[0]='\0';
strcat(filename1,filename);
```

## Melléklet

```
if(j<10){
    n[0]=szam[0];
    n[1]=szam[0];
    n[2]=szam[0];
    n[3]=szam[j];
    strcat(filename1,n);
    printf("%s\n",filename1);
}
else if(j<100){
    n[0]=szam[0];
    n[1]=szam[0];
    n[2]=szam[(j-j%10)/10];
    n[3]=szam[(j%10)];
    strcat(filename1,n);
    //printf("%s\n",filename1);
}
else if(j<1000)
{
    n[0]=szam[0];
    n[1]=szam[(j-j%100)/100];
    n[2]=szam[(j%100-(j%100)%10)/10];
    n[3]=szam[(j%10)];
    strcat(filename1,n);
    //printf("%s\n",filename1);
}
else
{
    n[0]=szam[(j-j%1000)/1000];
    n[1]=szam[(j%1000-(j%1000)%100)/100];
    n[2]=szam[(j%100-(j%100)%10)/10];
    n[3]=szam[(j%10)];
    strcat(filename1,n);
}
```

## Melléklet

```
//printf("%s\n",filename1);

}
//printf("%s\n",filename1);
//printf("utvonal1: %s\n",utvonal1);
//printf("utvonal: %s\n",utvonal);
//printf("filename1: %s\n",filename1);
strcat(utvonal1,utvonal);
//printf("fuz1_utvonal1 %s\n",utvonal1);
strcat(utvonal1,filename1);
//printf("fuz2_utvonal1 %s\n",utvonal1);
ap=fopen(utvonal1,"r");
if(ap>0)
    printf("sikerült beolvasni: %s\n",filename1);
else
    printf("nem sikerült beolvasni: %d\n",filename1);
    fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
sum=0.0;
for(k=1;k<=NODE;k++){
    fscanf(ap,"%d %f %f %f %f %f",&a,&b,&c,&d,&e,&g);
```

## Melléklet

```
        //printf("atlag: %f\n",e);
        sum+=e;
    }
    atlag=sum/NODE;
    printf("atlag: %f\n",atlag);
    fclose(ap);
}
if (current_time >TH){
    //printf("T_megad 300\n");
    begin_f_loop(f,t)
        F_PROFILE(f,t,i)=atlag;
    end_f_loop(f,t)

}
else{
    //printf("T_megad 288\n");
    begin_f_loop(f,t)
        F_PROFILE(f,t,i)=TIN;
    end_f_loop(f,t)

}

}

DEFINE_PROFILE(Temp_outlet,t,i)
{
    face_t f;
    real time;
    real current_time;
    FILE *ap;
    double sum,atlag;
    int k,j;
    int a;
```

## Melléklet

```
float b,c,d,e,g;
char filename1[26],filename[30],szam[15],utvonal[100],utvonal1[100];
char h[20],n[10];
filename[0]='F';
filename[1]='F';
filename[2]='F';
filename[3]='-';
filename[4]='S';
filename[5]='e';
filename[6]='t';
filename[7]='u';
filename[8]='p';
filename[9]='-';
filename[10]='O';
filename[11]='u';
filename[12]='t';
filename[13]='p';
filename[14]='u';
filename[15]='t';
filename[16]='-';
filename[17]='\0';
szam[0]='0';
szam[1]='1';
szam[2]='2';
szam[3]='3';
szam[4]='4';
szam[5]='5';
szam[6]='6';
szam[7]='7';
szam[8]='8';
szam[9]='9';
szam[10]='\0';
```

## Melléklet

//Útvonal megadása:

//D:\test\test2\_files\dp0\FFF\

```
utvonal[0]='D';
utvonal[1]=':';
utvonal[2]='\\';
utvonal[3]='t';
utvonal[4]='e';
utvonal[5]='s';
utvonal[6]='t';
utvonal[7]='\\';
utvonal[8]='t';
utvonal[9]='e';
utvonal[10]='s';
utvonal[11]='t';
utvonal[12]='2';
utvonal[13]='_';
utvonal[14]='f';
utvonal[15]='i';
utvonal[16]='l';
utvonal[17]='e';
utvonal[18]='s';
utvonal[19]='\\';
utvonal[20]='d';
utvonal[21]='p';
utvonal[22]='0';
utvonal[23]='\\';
utvonal[24]='F';
utvonal[25]='F';
utvonal[26]='F';
utvonal[27]='\\';
utvonal[28]='0';
```

## Melléklet

```
time=CURRENT_TIMESTEP;
current_time=CURRENT_TIME;
printf("Idolepes: %d\n",(int)(CURRENT_TIME/CURRENT_TIMESTEP));
j=(int)(CURRENT_TIME/CURRENT_TIMESTEP)-
(int)(TH/CURRENT_TIMESTEP);
if(j>0){
//printf("j ertek: %d\n",j);
filename1[0]='\0';
utvonal1[0]='\0';
strcat(filename1,filename);
if(j<10){
    n[0]=szam[0];
    n[1]=szam[0];
    n[2]=szam[0];
    n[3]=szam[j];
    strcat(filename1,n);
    printf("%s\n",filename1);
}
else if(j<100){
    n[0]=szam[0];
    n[1]=szam[0];
    n[2]=szam[(j-j%10)/10];
    n[3]=szam[(j%10)];
    strcat(filename1,n);
    //printf("%s\n",filename1);
}
else if(j<1000)
{
    n[0]=szam[0];
    n[1]=szam[(j-j%100)/100];
    n[2]=szam[(j%100-(j%100)%10)/10];
    n[3]=szam[(j%10)];
```

## Melléklet

```
        strcat(filename1,n);
        //printf("%s\n",filename1);
    }
else
{
    n[0]=szam[(j-j%1000)/1000];
    n[1]=szam[(j%1000-(j%1000)%100)/100];
    n[2]=szam[(j%100-(j%100)%10)/10];
    n[3]=szam[(j%10)];
    strcat(filename1,n);
    //printf("%s\n",filename1);

}
//printf("%s\n",filename1);
//printf("utvonal1: %s\n",utvonal1);
//printf("utvonal: %s\n",utvonal);
//printf("filename1: %s\n",filename1);
strcat(utvonal1,utvonal);
//printf("fuz1_utvonal1 %s\n",utvonal1);
strcat(utvonal1,filename1);
//printf("fuz2_utvonal1 %s\n",utvonal1);
ap=fopen(utvonal1,"r");
if(ap>0)
    printf("sikerült beolvasni: %s\n",filename1);
else
    printf("nem sikerült beolvasni: %d\n",filename1);

fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap,"%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
```

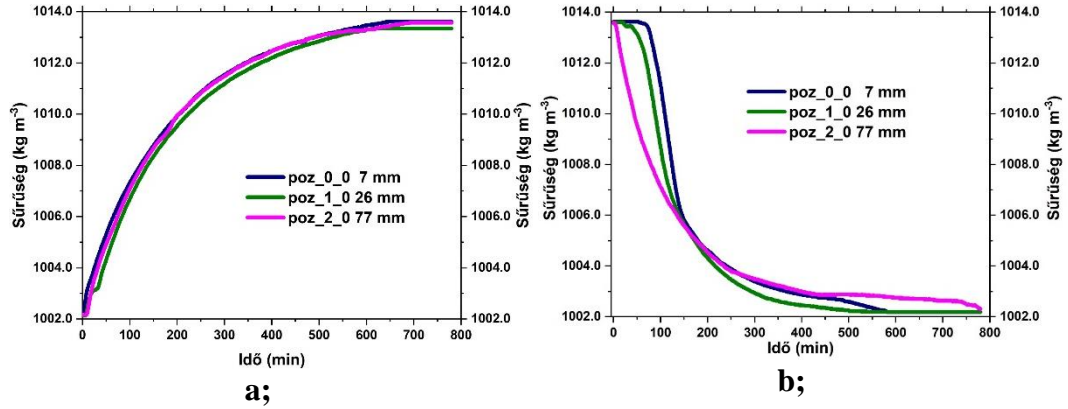


## Melléklet

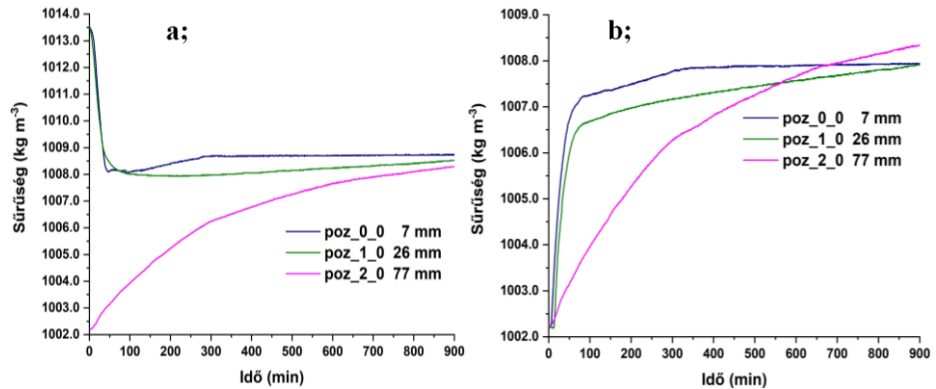
```
fscanf(ap, "%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap, "%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap, "%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
fscanf(ap, "%s",h);
//printf("atlag: %s\n",h);
sum=0.0;
for(k=1;k<=NODE;k++){
    fscanf(ap,"%d %f %f %f %f %f",&a,&b,&c,&d,&e,&g);
    //printf("atlag: %f\n",e);
    sum+=e;
}
atlag=sum/NODE;
printf("atlag: %f\n",atlag);
fclose(ap);
}
if (current_time >TH2){
    //printf("T_megad 300\n");
    begin_f_loop(f,t)
        F_PROFILE(f,t,i)=atlag;
    end_f_loop(f,t)
}
else{
    //printf("T_megad 288\n");
    begin_f_loop(f,t)
        F_PROFILE(f,t,i)=TIN2;
    end_f_loop(f,t)
}
}
```

## Melléklet

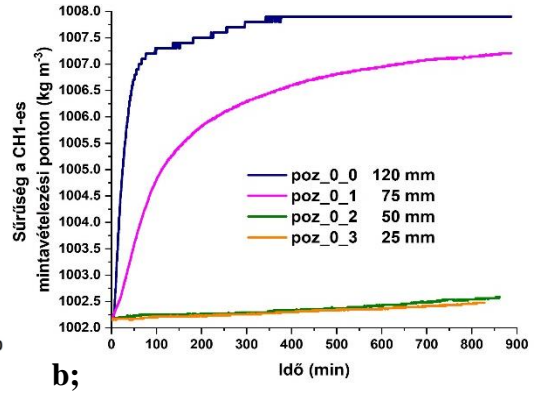
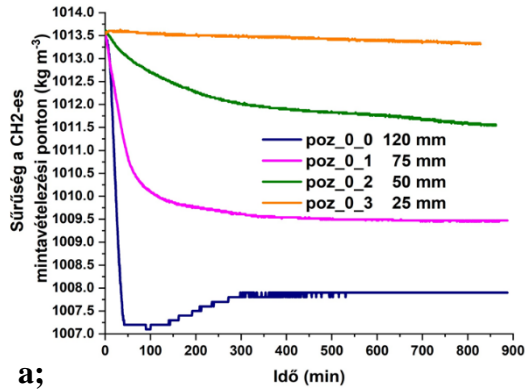
### 9. Melléklet: Pozitív (a); és negatív (b); zavaró jel alkalmazása során kapott sűrűség eredmények a CH2-es mintavételezési ponton különböző elvételi csonk pozíciókban



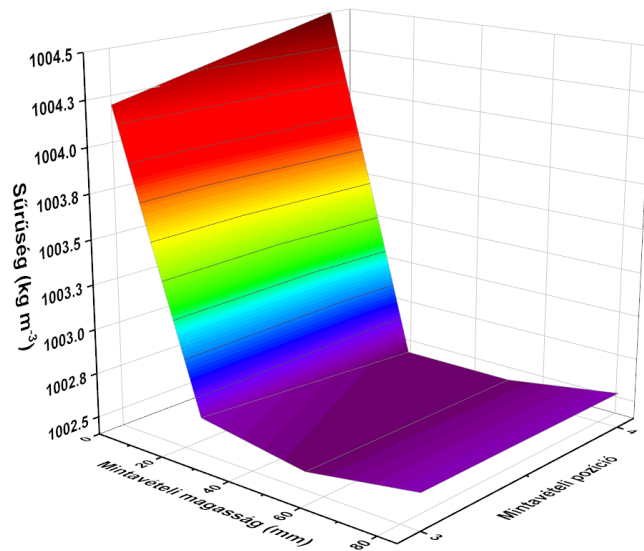
### 10. Melléklet: Recirkulációs vizsgálat során kapott sűrűség eredmények a; CH2-es mintavételezési ponton b; CH1-es mintavételezési ponton szívócsonk pozíciójának változtatása esetén



**11. Melléklet: Recirkulációs vizsgálat során kapott sűrűség eredmények a; CH2-es mintavételezési ponton b; CH1-es mintavételezési ponton nyomócsonk pozíciójának változtatása esetén**



**12. Melléklet 3 hengerelemű tartály esetén vett minták sűrűsége 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálása után**



## Melléklet

### 13. Melléklet 1 hengerelemű tartály esetén vett minták sűrűsége 1002.2 kg m<sup>-3</sup> sűrűségű oldat betáplálása után

