



**XXXII. Országos
Tudományos Diákköri
Konferencia**

2014



**Turbinakeverők keverési hatékonyságának és
villamos energiaszükségletének analízise**

Készítette:

Molnár Bálint

Témavezető:

Dr. Varga Tamás, egyetemi adjunktus
Egedy Attila, tudományos segédmunkatárs

Folyamatmérnöki Intézeti Tanszék
Mérnöki Kar

Pannon Egyetem

Veszprém

Tartalom

1.	Bevezetés	1
2.	Irodalmi összefoglaló	3
2.1.	<i>A keverés művelete</i>	3
2.2.	<i>Turbulencia modellek</i>	4
2.3.	<i>Keverést jellemző mennyiségek</i>	7
2.4.	<i>Mérési eszközök, technikák</i>	9
2.4.1.	Keverési idő meghatározása	9
2.4.2.	Villamos energiaigény mérése	10
2.4.3.	Keveredés mértékének meghatározása	10
2.5.	<i>Numerikus áramlástan (CFD)</i>	12
3.	Gyakorlati rész.....	14
3.1.	<i>Méréshez használt berendezés bemutatása</i>	14
3.2.	<i>A kevert berendezés CFD modelljének megalkotása</i>	15
3.3.	<i>A kísérleti berendezésben kialakult áramlási képek vizsgálata</i>	18
3.4.	<i>Sebességtér homogenitásának vizsgálata hisztogramok alapján</i>	18
3.5.	<i>Keverési idő meghatározása</i>	25
3.6.	<i>Keverés energetikai vizsgálata</i>	26
4.	Összefoglalás	30
	Jelölésjegyzék	31
	Köszönetnyilvánítás	32
	Irodalomjegyzék	32

1. Bevezetés

A vegyipar területén lejátszódó folyamatok többségénél fontos a folyadékok hatékony keverése és elegyítése, ezért a keverés a legfontosabb műveletek közé tartozik. A keverést létre lehet hozni mechanikai módon egy tengelyre szerelt forgó mozgású elemmel, vagy pneumatikusan nagysebességű fluidárammal. Elterjedtek még a statikus keverők is, melyeknél egy álló elem hatására a fluidum megváltoztatja az áramlási irányát, így javítva a fázisok homogenizálását. A fluidumok keverésének megvalósítása fontos a kevert berendezésekben lejátszódó folyamatok (a hőátadás, a komponensátadás, reakció lejátszódása) szempontjából. A keverés hozzájárul még az optimális üzemeltetési paraméterek hatásának érvényesítéséhez is, a fázis megfelelő homogenizálásával.

A mechanikai keverés használata sok területen elterjedt a bányásztól kezdve a hidrometallurgián át, egészen a bonyolult kémiai reakciókra épülő folyamatokig (például fermentáció, szennyvíztisztítás, polimerizáció, kristályosítás). Leggyakrabban kevert berendezésekben, tartályokban, reaktorokban történik a fázisok keverése, ahol fontos a hőmérséklet- és koncentrációkülönbség kiegyenlítése a kevert fázis(ok)on belül, valamint az optimális üzemeltetési paraméterek érvényesítése. A keverés segíti megvalósítani két egymással nem elegyedő folyadék homogenizálását, emulziók készítését, szilárd részecskék szuszpendáltatását, oldását, valamint gázok folyadékban való diszpergálását is.

A kevert berendezések többféleképpen osztályozhatók. Működésük szerint beszélhetünk szakaszos, félfolyamatos, illetve folyamatos reaktorokról, termikus működés alapján megkülönböztethetünk izoterm és adiabatikus reaktorokat, valamint az alkalmazott keverőelem alapján, beszélhetünk például turbina-, lapát-, penge-, propellerkeverőkről, stb.. A dolgozatban több különböző geometriájú turbinakeverő esetén vizsgáljuk, egy szakaszos üstreaktor hidrodinamikai viselkedését.

Mivel a reaktorok legtöbbször egy működő technológia legfontosabb részei, ezért kísérleti információk nehezen szerezhetők be, illetve előfordulhat, hogy egy modell felépítéséhez szükséges adatok összegyűjtése hosszú időbe telik. Megoldást jelenthetnek a félüzemi méretben elvégzett kísérletek, de ezekben az esetekben a méretnövelés okozhat problémát, ugyanis ez jelentősen befolyásolhatja a berendezésben kialakítandó áramlási képet. A berendezések méretnövelésével sok kutató foglalkozott már, és rengeteg elképzelés, megoldás került kidolgozásra. Az információátvitelre az egyik szintről a másikkra a dimenziómentes számok szolgálhatnak, azonban ezek alkalmazására rengeteg egyszerűsítést kell bevezetnünk a valóság kapcsán, így módon az összetett belső kialakítású berendezések

esetén már nem alkalmazhatók az elvárt pontossággal. Manapság a berendezések belső komplexitásának növekedésével már széles körben alkalmazható tervezőprogramok állnak rendelkezésre.

A reaktor geometriai paramétereinek, a különböző keverőelemek számának, méretének, szögének, valamint a terelőlemezek használatának változtatásával hatékonyan változtatható a keverős reaktorok teljesítménye. Ám a paraméterek nagy száma egyben nehezíti teszi az aktuális feladatra alkalmazandó optimális konfiguráció kiválasztását, valamint befolyásolja a keverőelem villamos energiaszükségletét is, mely az egyik legfontosabb tervezési paraméter a kevert reaktorok tervezése során, mivel az ehhez kapcsolódó költségek jelentősen hozzájárulhatnak az üzemek teljes üzemeltetési költségének alakulásához. Mivel a villamos energiaigény hatással van a hő- és anyagátadási folyamatokra, valamint a keverési időre is, annak pontos becslése egy fontos paraméter egy kevert reaktor méretnövelése, üzemeltetése és tervezése során. Lényeges megemlíteni, hogy a villamos energiaszükséglet alapvetően meghatározza a keverő keverési hatékonyságát is.

Annak érdekében, hogy ezt a sokrétűen alkalmazott műveletet vizsgálni tudjuk a technológia megbontása nélkül, a numerikus áramlástan (Computational Fluid Dynamics - CFD) módszerek használata javallott. A CFD módszerek segítségével lehetséges leírni olyan berendezéseket a tényleges fizikai valójukban, amelyeknek szimulációja más módszerekkel hosszú időbe telne, vagy nem is lenne megoldható a kellő részletességgel. A dolgozat első részében a témába vágó irodalmat tekintjük át, majd a gyakorlati részben szó lesz a tervezett vizsgálatok elvégzéséhez szükséges modellalkotásról, a sebességű mezők hisztogramok alapján való ábrázolásáról, a keverőelemek villamos energiaszükségletének számításáról. Végül a hisztogramok és villamos energiaszükségletek alapján a különböző geometriájú keverőelemek összehasonlítását mutatom be.

A kutatómunka során elsődleges célunk egy olyan mérőszám megalkotása, mely alkalmazásával összehasonlíthatóvá válnak a különböző geometriájú keverővel ellátott, szakaszos és folyamatos reaktorok.

2. Irodalmi összefoglaló

Az irodalmi összefoglalóban röviden áttekintem a keverést, mint műveletet, valamint az ezt jellemző mennyiségeket. Továbbá ismertetem a keveredés, a keverési idő, valamint a villamos energiaszükséglet mérésére eddig alkalmazott eszközöket, technikákat. Végül bemutatom a numerikus áramlástant (CFD), valamint mivel a keverési modell kulcsfontosságú része a turbulencia leírása, modellezése, ezért ismertetem a fontosabb turbulencia modelleket.

2.1. A keverés művelete

Egy kevert berendezés tervezésénél mindig ügyelni kell a benne lejátszódó folyamatokra (hőátadás, komponensátadás, reakció lejátszódása), az optimális üzemeltetési paraméterekre, megfelelő fázishomogenizálásra. A keverésnél két vagy több (egymástól eltérő anyagi tulajdonsággal bíró) anyagot kényszeráramlással egyesítünk, homogenizálunk azért, hogy az egyes alkotórészek eloszlása a legkisebb térfogatelemekben is a kívánt keverési aránynak feleljen meg. A vegyipar közel 50 %-ban keverős berendezéseket használ nagy mennyiségű és drága anyagok gyártásához [1]. A következő folyamatokhoz használnak keverő berendezéseket:

- egynemű folyadékok, mint például gázolaj adalékok, kenőolajok kevertetése;
- szilárd anyagok kristályosítóban, polimerizáló reaktorokban, oldószer extraháló berendezésekben való szuszpendáltatása;
- fluidumok kevertetése és emulzifikálása hidrolízis, extrakció, szuszpenziós polimerizáció, kozmetikumok céljából;
- gáznak folyadékban való diszpergáltatása abszorpció, sztrippelés, oxidáció, hidrogenáció, ózonizáció, fermentáció céljából;
- viszkózus folyadékok homogenizálása festékek, ételek gyártása céljából;
- hőátadás intenzifikálása céljából.

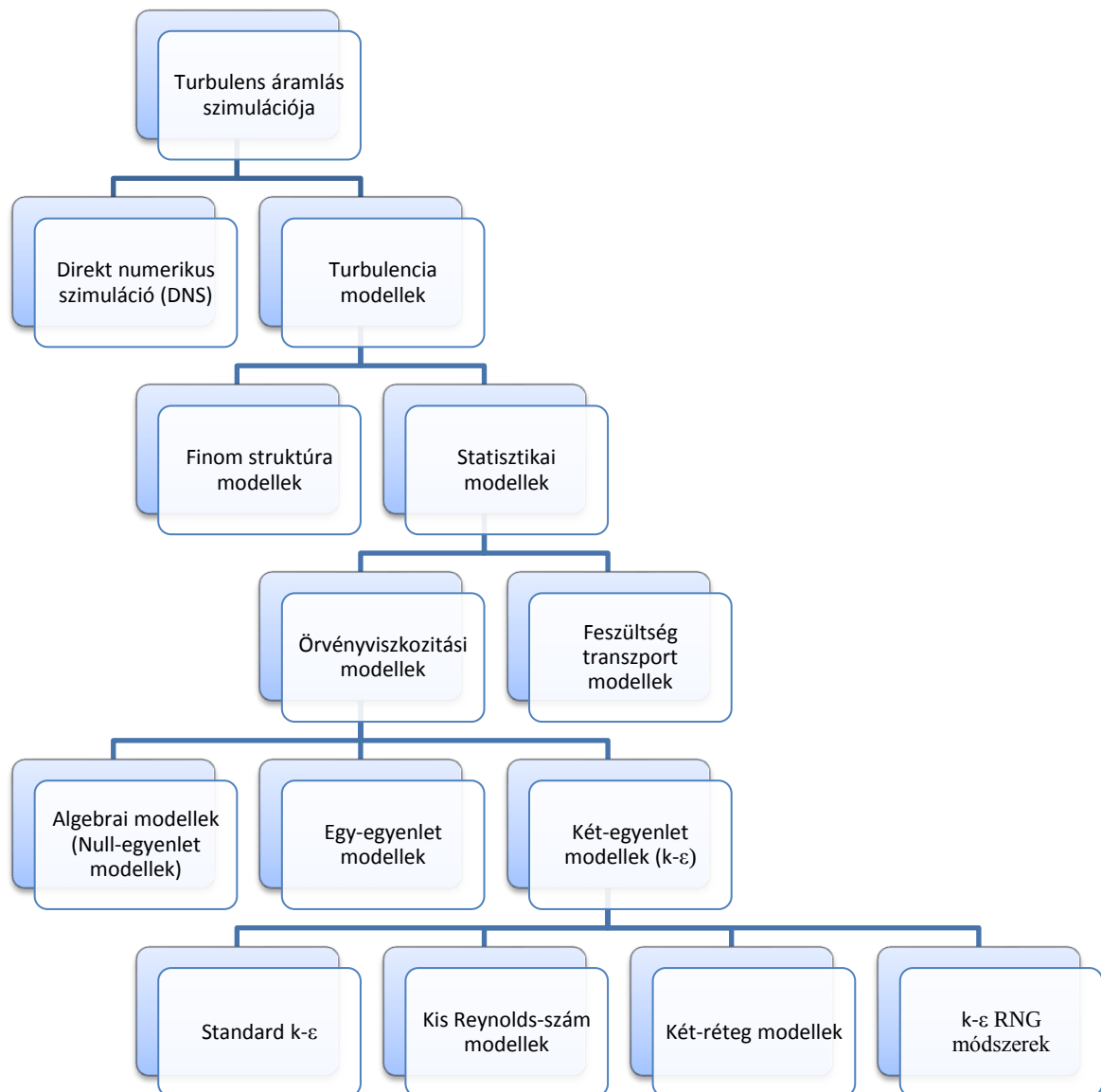
A valós keverés során gyakran turbulens áramlás alakul ki, és ez elősegíti a hatékonyabb keverést. A keverőt tartalmazó berendezésekkel foglalkozó tudományok fejlődésével több turbulencia modell alakult ki, melyek jól leírják a keverés során a tartályban létrejött áramlási viszonyokat. A következő fejezetben ezeket turbulencia modelleket mutatnám be [2].

2.2. *Turbulencia modellek*

A modellezés bizonyítottan [3] kevésbé költséges hosszú távon, mint a tényleges keverésre irányuló kísérletek, és sokkal részletesebb információt is biztosít, így a kutatók érdekeltek abban, hogy olyan modelleket alkossanak meg, melyek megbízhatóan tudják leírni a keverést. A keverési modell kulcsfontosságú része a turbulencia leírása, modellezése, mely megvalósítására a mai napig széles körben vállalkoznak kutatók. Ezekben a modellekben egyértelmű kapcsolatot lehet felfedezni a modell komplexitása és a mögöttes fizika reprezentációja között. Az elmúlt pár évtized során a kutatók változatos és nagyszámú modelleket dolgoztak ki, melyek közül a műszaki gyakorlatban elterjedt turbulenciamodelleket M. Griebel, T. Dornsifer és T. Neuhoefter (1998) német szerzők az 1. ábra szerint csoportosították [4].

A direkt numerikus szimuláció (DNS) feltételezi az összenyomhatatlan közeget, így a kontinuitási egyenlet és a háromdimenziós Navier-Stokes-féle skalár mozgásegyenletek időfüggő megoldását szolgáltatja a turbulens áramlásban előforduló örvényméretek figyelembevételével. A mozgás minden jellemző léptékének megoldása explicit módon történik, átlagolást nem alkalmaznak a modellben [4]. A DNS alkalmazásával kapcsolatos numerikus tapasztalatok azt mutatják, hogy a Reynolds-szám növelésével a szükséges időlépések száma is növekszik, ezáltal a számítógépes futtatás időigényessé válik [5]-[6]. A módszer előnyei, hogy a mozgásegyenleteinek numerikus megoldását szolgáltatja, ezért elvben megfelelően tükrözi a turbulens áramlási problémákat. Napjainkban kezdi átvenni a laboratóriumi mérések szerepét egyszerűbb áramlási feladatok esetén, mert a turbulens áramlások jellemzőivel kapcsolatban olyan információkat is szolgáltat, amelyek a mai mérési technikákkal hozzáférhetetlenek. A módszer hátránya, hogy korunk számítógépeinek teljesítménye mellett nehézséget jelent a korlátozott számítógép memóriakapacitás, mert a számítások és a kapott eredmények feldolgozása nagy tárhelyet igényel, emiatt leggyakrabban csak alacsony Reynolds-számok esetén alkalmazható.

Az egyik leggyakoribb számítási eljárás a large eddy szimuláció (LES). A számítási módszer egy szűrési eljárás alapján, a turbulens áramlásban fellépő kis és nagy örvénystruktúrákat két csoportba rendszerezi, ezáltal a turbulens tömeg-, impulzus- és hő transzportjáért felelős nagyobb örvények kerülnek a numerikus vizsgálatok középpontjába, a kis örvényeket pedig idő szerint átlagolja [7].



1. ábra: Méréshez használt laboratóriumi keverő berendezés

A módszer előnye, hogy nagyobb Reynolds-szám tartományban is kielégítő számítási eredményeket szolgáltat. A módszer hátrányai, hogy szilárd felületek esetén a peremfeltételek megadása problematikus lehet, mivel a modell a fal mentén kialakult kisebb örvényekkel nem foglalkozik részletesen. Az egyre nagyobb teljesítményű számítógépek megjelenése kedvez a turbulens áramlási folyamatok DNS és LES útján történő modellezésnek [8].

A turbulencia-modellek következő csoportját a feszültség transzport modellek alkotják. Osborne Reynolds nyomán a turbulens áramlást leíró alapegyenletek időátlagát, a turbulens

ingadozások periódusidejéhez mérten kellően nagy időintervallumban képezte le. Az időátlagolás következtében a mozgásegyenletekben az ismeretlen turbulens ingadozási komponensek szorzatainak időátlagai jelennek meg, amelyek a Reynolds-féle látszólagos feszültségtenzor elemeit alkotják [9]. A modellezés során az ismeretlen mennyiségeket tapasztalati formulákkal helyettesítik, vagy ezen ismeretlen turbulens ingadozásokra nézve újabb differenciálegyenleteket vezetnek be. A feszültség transzport modellek a Reynolds átlagolt Navier-Stokes (RANS) egyenletek megoldásán alapulnak, s a Reynolds-féle látszólagos feszültségtenzorok minél pontosabb meghatározására törekednek. Ennek a modellnek a továbbfejlesztett változatai a nyomás-feszültség modellek (pressure-stress models [10]) és a diffúziós modellek (diffusion models [11]), amelyek napjaink kutatási tárgyát képezik. Az örvényviszkózitási modellek a Boussinesq-féle örvényviszkózitási hipotézisen [12] alapulnak és a Reynolds átlagolt Navier-Stokes (RANS) egyenlet modellek közé sorolhatók. A Reynolds-féle látszólagos turbulens feszültségtenzort nem-lineáris algebrai approximációkkal helyettesítik, további differenciálegyenletek bevezetése nélkül [13]-[14].

Az örvényviszkózitási modellek csoportján belül algebrai (null-egyenlet) modelleket, egy-egyenlet és két-egyenlet modelleket különböztethetünk meg a kontinuitási és a mozgásegyenleteken kívül bevezetett egyenletek száma szerint. Az algebrai (null-egyenlet) modellek a legegyszerűbb turbulencia-modellek, mert a domináns turbulens nyírófeszültséget skalár örvényviszkózitási tényezővel definiálják. Előnyük, hogy könnyen algoritmizálhatók és jó leírást adnak egyszerűbb turbulens áramlási feladatok esetén. Hátrányuk, hogy csak a folyadék átlagjellemzőit és a domináns turbulens nyírófeszültségeket veszik figyelembe, és leváló áramlások esetén nehezen alkalmazhatók. Ilyen típusú modellek a L. Prandtl-féle (1925) [15] keveredési úthossz modell, a Baldwin-Lomax (1978) [16] és a Cebeci-Cousteix-féle (1999) [17] algebrai turbulencia-modellek.

Az egy-egyenlet modellek [18] a k turbulens kinetikus energiára vagy az ε turbulens kinetikus energiadiSSIPáció sebességére vonatkozóan vezetnek be egy-egy mérlegegyenletet, és ezeknek a jellemzőknek a segítségével definiálják az örvényviszkózitást. Az egy-egyenlet modellek többségükben a k turbulens kinetikus energiára tartalmazznak mérlegegyenletet.

A két-egyenlet modellek [19] a k turbulens kinetikus energiára és az ε turbulens kinetikus energiadiSSIPáció sebességére vonatkozóan egyaránt tartalmazznak egy-egy transzportegyenletet, és ezek megoldása révén határozzák meg az örvényviszkózitást.

A műszaki gyakorlatban a legelterjedtebb a B. Launder- és a D. Spalding-féle (1972) $k-\varepsilon$ turbulencia-modell [20]. A standard $k-\varepsilon$ modell, az alacsony Reynolds-szám modellek, a két-réteg modellek (two-layer models [21]), és a $k-\varepsilon$ renormalizációs módszerek a két-egyenlet modellek továbbfejlesztett változatai. Az egy-egyenlet és két-egyenlet modellek előnye, hogy egyszerűségükből adódóan a műszaki gyakorlatban jól alkalmazhatók, és a velük való számítások hatékonyan algoritmizálhatók. Hátrányuk, hogy alkalmazzák a Boussinesq-féle örvényviszkozitási hipotézist, és ebből következően olyan turbulens áramlások esetén, ahol a deformációsebesség tenzorában hirtelen változások lépnek fel, pontatlan megoldást eredményezhetnek.

Az előzőek összefoglalásaképpen elmondható, hogy a XIX. század óta született turbulencia modellek csupán egy-egy meghatározott áramlásikép esetén érvényesek. A dolgozatban mi a $k-\varepsilon$ turbulencia modell alkalmazásával készítettük el a vizsgált berendezés dinamikus szimulátorát.

2.3. *Keverést jellemző mennyiségek*

Mivel kezdetben a keverést jellemző mennyiségek direkt matematikai leírása szinte lehetetlen volt, ezért a keverőelem és a keverés paramétereinek kapcsolatára empirikus összefüggéseket írtak fel a kutatók. Ugyanakkor kiderült, hogy ezek a keverést jellemző mennyiségek jól megalapozott kapcsolatban állnak az áramlástant vizsgáló módszerekkel, így a dimenzióanalízis, valamint elméleti modellek segítségével egy olyan szerkezet került kifejlesztésre, mely kielégítően leírja a legtöbb áramlástannal kapcsolatos problémát. A XIX. század vége felé találhatóak az első olyan publikációk, melyekben a keverést jellemző mennyiségekről számolnak be. Ebben az időben írták fel az első olyan dimenziómentes egyenletet (1) melyből a keverést jellemző mennyiségek levezethetők voltak a keverőelem (D , p , n , w , r) és a tartály geometriájának (T), a kevert anyag tulajdonságának (ρ , μ), a keverés sebességének (N) valamint a gravitációs gyorsulásának (g) függvényében [22]-[23]-[24].

$$f\left(\frac{D^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu}, \frac{D \cdot N^2}{g}, \frac{P \cdot g_c}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5}, \frac{D}{T}, \frac{D}{Z}, \frac{D}{C}, \frac{D}{p}, \frac{D}{w}, \frac{D}{r}, \frac{n_2}{n_1}\right) = 0 \quad (1)$$

Az (1) minden tag biztosítja a kinematikai és dinamikai hasonlóságot különböző méretű rendszerek esetén. Két rendszer esetében, ha az összes jelenlévő erőhatás aránya egyenlő, akkor dinamikus hasonlóságról, míg ha minden pontban a sebességek aránya egyenlő, akkor

kinematikus hasonlóságról beszélhetünk. Ha geometriailag hasonló rendszereket feltételezünk, akkor az előző egyenletet egyszerűsíteni lehet, és a (2)-t kapjuk.

$$f\left(\frac{D^2 N \cdot \rho}{\mu}, \frac{D \cdot N^2}{g}, \frac{P \cdot g_c}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5}\right) = 0 \quad (2)$$

A (2)-ben található tagok esetén csak a kinematikai és dinamikus hasonlóság biztosított. Ezt az összefüggést dimenzióanalízis útján kaptuk meg, viszont a Navier-Stokes egyenletből is ugyanezek a dimenziómentes tagok levezethetők. Viszont ahhoz, hogy egy kevert rendszerben egy összetett, háromdimenziós áramlást megfelelően tudjunk jellemezni, ahhoz a Navier-Stokes egyenlet analitikus megoldása nem elegendő [25]-[26]. A (2)-t dimenziómentes formára alakítva a (3)-t kapjuk:

$$F\left(\frac{L \cdot v \cdot \rho}{\mu}, \frac{v^2}{L \cdot g}, \frac{\Delta p}{\rho \cdot v^2}\right) = 0 \quad (3)$$

Az első tag a (3)-ban a Reynolds-számot képviseli, mely a tehetetlenségi erők és a viszkozus erők arányát írja le. Mivel ez az arány határozza meg, hogy egy áramlás lamináris vagy turbulens, a Reynolds-szám a keverést jellemző mennyiségek egyik legfontosabb eleme. Hasonló rendszerek esetén, bármely megfelelő sebesség és geometriai hossz alkalmazása elfogadott, mellyel a (4) alapján meghatározható a Reynolds-szám.

$$Re = \frac{D^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \quad (4)$$

A (3) második tagja Froude szám néven ismert, és a tehetetlenségi és gravitációs erők arányát írja le. Egy keverő esetén a Froude szám a következő alakban írható fel:

$$Fr = \frac{N^2 \cdot D}{D \cdot g} \quad (5)$$

A legtöbb keverési műveletet szabad folyadékfelszínnel rendelkező tartályban végzik. A felület alakja, és ez által az áramlási kép a tartályban a gravitációs erőter által befolyásolva van. A tartályban kialakuló örvény alakja képviseli a gravitációs és a tehetetlenségi erőter egyensúlyát, ez különösen olyan tartályokban észrevehető, melyekben nem alkalmaznak terelőlemezeket.

A (3) harmadik tagja az úgynevezett „nyomási koefficiens”, mely a tehetetlenségi erők által létrehozott áramlások által kialakult nyomáskülönbségek arányát írja le. A gyakorlatban a nyomás eloszlása a tartályban nem ismert, de a dinamikusan hasonló rendszerek esetén

kimutatható, hogy a nyomáskülönbség és a keverőelem teljesítménye kapcsolatban áll. Ezt felhasználva kapjuk a keverőelemeket jellemző Newton számot, mellyel a keverőelem energiaszükségletét jellemezhetjük, valamint a viszkozitás a teljesítménnyel kapcsolatát mutatja meg.

$$Ne = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5} \quad (6)$$

2.4. Mérési eszközök, technikák

A keveredési folyamatokat kvantitatív és kvalitatív módon is lehet minősíteni, melyekre az elmúlt évtizedekben többféle módszert is kidolgoztak a kutatók. Attól függően, hogy milyen fázishomogenizálási műveletet (egy fázis keverése, szilárd anyag keverése folyadékban, folyadék diszpergáltatása folyadékban, gáz-folyadék keverés) végzünk, a mérési technikák is különböznek. A következőkben azon mérőrendszerek kerülnek röviden bemutatásra, melyek egy fázis keverését minősítik, mivel a dolgozat gyakorlati részében is egy fázis keveredését vizsgálom. Ezen kívül fontos paraméter a keverőelem villamos energiaszükséglete is, melynek méréséről szintén szeretnék szót ejteni.

2.4.1. Keverési idő meghatározása

A fázisok keveredési sajátosságainak meghatározására a legelterjedtebb módszer a keverési idő meghatározása. Ez azt az időt jelenti, mely alatt egy betáplált fluidum a keverővel ellátott berendezésben, egy előre meghatározott fokú homogenitást ér el [27]. Ennek meghatározására többféle módszert dolgoztak ki. Egyik ilyen módszer a homogenitás meghatározására az áramlás láthatóvá tétele. Ennek egyik legegyszerűbb (legköltséghatékonyabb) módja, hogy egy vékony papírlapot teszünk a berendezésbe. Ennek a papírlapnak a fényvisszaverődése látszódní fog a berendezés falán keresztül, és akár ez videofelvételen is rögzíthető, majd a keverési idő ebből számolható. A mérés pontosabbá tehető lézer vagy prizma alkalmazásával.

A keverés mértékének meghatározására alkalmazhatnak festéket, melynek a fluidumon belüli mozgása látható lesz. Ám ez nem mindig működik megfelelően, mert a kevésbé kevert régió előtt vagy mögött látható festék meghamisíthatja az eredményt. Ennek kiküszöbölésére

színvesztési eljárást találtak ki, mely során a legkevesbé kevert rendszer fogja időben a legkésőbb elveszteni a színét. Ezt a módszert lehet pH érzékeny festékekkel is megvalósítani, mellyel reakciók lejátszódását is vizsgálhatják.

A keverési idő kvantitatív méréséhez szükséges egy bizonyos kémiai anyagnak a rendszerbe adagolása, mely a közegtől különböző tulajdonságokkal rendelkezik. A berendezésből meghatározott időközönként vett minta analízise szerint megkülönböztethetők az alábbi vizsgálatok:

- off-line mérés (a mintákban lévő markerek koncentrációit mérik) [28];
- Schlieren effektuson alapuló mérés (fényszóródást mérik) [29];
- termoelem alapú mérés (a közegtől eltérő hőmérsékletű fluidum betáplálása a rendszerbe) [30];
- vezetőképesség mérése (elektrolit adagolása a berendezésbe) [31].

A vezetőképesség mérésén alapuló módszerek alkalmasak egy üstreaktorban való átlagos tartózkodási idő meghatározására is. A felsorolásban említett méréseket lehet rögzíteni időben, s így lehetőség van olyan modell validációs módszerek kidolgozására, amelyek a rendszer viselkedését leíró CFD modellek ellenőrzését teszik lehetővé. A vázolt megoldások közül vannak olyan módszerek is melyek esetén az időbeli rögzítés eredménye egy videofelvétel, ezek alkalmazásához transzparens reaktor szükséges [32].

2.4.2. Villamos energiaigény mérése

A villamos energiaigény fontos paraméter a reaktorok, kevert tartályok tervezésénél. Azt határozza meg, hogy időegység alatt mennyi energia kell ahhoz, hogy mechanikai vagy pneumatikus keverés segítségével létrehozzuk a fluidum áramlását. A felhasznált áram mennyisége kapcsán felmerült költségek jelentősen hozzájárulnak egy üzem teljes üzemeltetési költségéhez. Éppen ezért fontos, hogy a keverési folyamat hatékonyan, minél kisebb energia felhasználásával legyen megvalósítva [33].

2.4.3. Keveredés mértékének meghatározása

A keverési idő mellett egy keverővel ellátott berendezést megfelelően lehet jellemezni a keveredés mértékének megadásával. Ennek meghatározására még kevés módszert dolgoztak

ki. Egyik ilyen módszer azt használja fel, hogy két reaktív fluidum nem tud addig reakcióba lépni, míg az őket alkotó molekulák, molekuláris szinten el nem keverednek. A termékeloszlásból lehet következtetni a keverés minőségére; valamint a megfelelő keverési modell használata mellett a termékeloszlásból visszaszámolható a keverési arány [34]. Az egyik leggyakrabban alkalmazott reakciórendszer, mellyel leírható a keverés mértéke a Bourne-reakció séma [35]. Lényege, hogy egy ismert kinetikával rendelkező párhuzamos reakciórendszert alkalmazunk, mely keverés és annak elhagyásával különböző mértékben mennek végbe, és ebből lehetőségünk van a keverés mértékére következtetni.

A keveredés mértékének meghatározását lézer-indukált fluoreszcenciával (LIF) is el tudják végezni. Ennek a módszernek az alapjai a közelmúltban lettek lefektetve, így a módszer alkalmazása egyelőre nem terjedt el széles körben [36]-[37].

Az első energiafogyasztás mérési technikák watt- és ampermérőkkel volt megvalósítva [38]. Ez az egyik legegyszerűbb módszer, aminek alacsony műszerezési igénye van, viszont laboratóriumi mérések során az összes energia felhasználás 70 %-a elveszhet a mérés során. Ezért nagy szükség van hatékonysági és teljesítmény faktorok alkalmazására a különböző keverőelemek esetén. A veszteségek javítása érdekében kalorimetriás méréseket vezettek be, melyek a berendezés energiamérleg alapul véve határoztak meg a keverés energiaigényét. Ez egy nagyon pontos mérési módszer, de magas szintű műszerezettséget igényel, és a termisztorok elhelyezése a vizsgált berendezésben kritikus lehet. Oosterhuis [39] szerint, a falon keresztüli energiavesztés a befektetett energia 1 %-a csupán.

Egy másik módja a kevert berendezésekben való energiafelhasználás mérésének a dinamométerek alkalmazása, melyek működésének alapja Newton III. törvénye [40]. Ez a módszer széles körben elterjedt, mivel tág nyomatóktartományban képes pontosan mérni, de magas a beszerelési költsége, és több keverőelem alkalmazása esetén az egyes keverőelemek energiaigényét külön-külön nem lehet meghatározni ezzel a módszerrel [41].

A nyomatókmérő alkalmazása mind az iparban, mind a laboratóriumokban széles körben elterjedt, mivel nyomatókot, sebességet, erőt, nyomást és áramlást is lehet vele mérni [42]. A mérési módszer előnye, hogy széles nyomatóktartományt képes lefedni, és alacsony műszerezési igénye van, viszont ebben az esetben sem lehet több keverőelem esetén az egyes keverőelemek villamos energiaszükségletét mérni egyidőben. Ez a keverőelemenként független mérés, csak nyomásmérő bélyegek alkalmazásával oldható meg [43].

2.5. Numerikus áramlástan (CFD)

1960-as évektől kezdtek megjelenni a ma is használt CFD kódok (Particle-In-Cell, Marker-and-Cell, Arbitrary Lagrangian-Eulerian módszer, stb.) [44]. Sajnos még a közönséges differenciálegyenleteknek is csak egy részére van egzakt megoldási módszerünk, az esetek nagy részében csak közelíteni tudjuk a pontos eredményt. A számítógépek gyors fejlődésének köszönhetően azonban, egyre inkább előtérbe kerültek azon numerikus módszerek (véges differencia módszer (Finite Different Method - FDM), véges elemek módszere (Finite Element Method - FEM), véges térfogatok módszere (Finite Volume Method - FVM)), amelyek segítségével numerikusan meghatározhatók az állapotváltozók alakulásai [45].

A számítógépek adattárolási és feladatmegoldó képességei lehetővé tették a numerikus módszerek jóval nagyobb sebességgel való elvégzését. Egyik fő oka a CFD elterjedésének a szimulációs idő drámai csökkenése volt, aminek oka a számítástechnika elmúlt évtizedekben tapasztalt rohamos fejlődése.

A CFD az áramlástan probléma megoldása esetén a vizsgált teret véges számú és méretű elemekre bontja, melyekben úgynevezett közelítő függvényekkel keresi a berendezés adott pontjában a megfelelő állapotváltozó értékeit. Ezen közelítő függvények paramétereit az iterációs lépésekben fokozatosan finomítja, mind addig amíg kellő hibahatár alá nem csökken a számítás minősége. A szoftverek mára már a gyakorlati feladatok megoldására hatékonyan felhasználhatók. A numerikus áramlástan segítségével számítható – a teljesség igénye nélkül - hőátadás, hővezetés, kémiai reakciók, égés, többfázisú áramlás, forgógépek (turbina, szivattyú) működése, gázok terjedése és szuperkritikus anyagok viselkedése.

A numerikus áramlástan számítások alkalmazása először az űrhajógyártásban terjedtek el (mivel ott állt rendelkezésre a kellő számítási kapacitás), de ma már számos területen használják a benne rejlő lehetőségek miatt. A CFD modellek megoldását támogató szoftverek lecsökkentik a gyártási és tervezési költséget, lehetőséget adnak a bonyolultabb geometriával bíró rendszerekben lejátszódó folyamatokat leíró matematikai modellek megoldására is. A ma piacon kapható CFD számítások elvégzésére alkalmas szoftverek kialakítása során törekednek arra a fejlesztők, hogy az egy könnyen alkalmazható program legyen. Néhány alkalmazási terület a teljesség igénye nélkül:

- Repülőipar: hőmérsékletingadozás okozta fluktuáció, gyorsulás vizsgálata, szélcsatornák iránti igény csökkentése (tényleges objektum egy kicsinyített modelljének való vizsgálata) [46].

- Hő- és áramlástechnikai gépek: kompresszor hatásfokának növelése, égőterekben és turbinákban lezajló folyamatok modellezése [47].
- Gépjárműgyártás: kocsiszekrény aerodinamika, utastér ventiláció, áramlástan rendszerek motorban, illetve segédberendezésekben való vizsgálata, üzemanyag-fogyasztás csökkentése [48].
- Biztonságtechnika: tűz- és füstterjedés előrejelzés, robbanás és egyéb véletlenszerű folyamatok modellezése [49].
- Meteorológia: hosszú- és rövidtávú időjárás előrejelzés, globális klíma modellek [50].
- Épületgépészet: épületfűtés és szellőzés analízis, tűzvédelmi és külső aerodinamikai hatások vizsgálata [51].
- Csillagászat: hozzájárulás a világegyetem eredet-kutatáshoz, galaxisok kialakulásának modellezése, mágneses viharok, napszél és hatása a Földre [52].
- Nukleáris technika: üzemelő atomerőművek, kutató és oktató reaktorok főberendezéseinek vizsgálata, kutatás-tervezés alatt álló atomreaktor-koncepciók alatt álló atomreaktor-koncepciók vizsgálata, fúziós berendezések egységeinek vizsgálata [53].

A nagyszámú és változatos alkalmazási területnek köszönhetően újabb és újabb CFD szimulátorok kerülnek forgalomba évről évre. A dolgozatban a COMSOL Multiphysics programcsomagot használtuk a szimulációs vizsgálatok elvégzéséhez szükséges számítások elvégzésre.

3. Gyakorlati rész

A következő fejezetben bemutatom a valós rendszer numerikus áramlástani szimulátorát, melyet COMSOL Multiphysicsben készítettünk el, valamint a validáshoz alkalmazott berendezést. Ebben a fejezetben kerül bemutatásra a szimulátoron, valamint a valós rendszeren elvégzett homogenitás, keverési idő, és villamos energiaszükséglet mérésére végzett vizsgálatok leírása, valamint az eredmények ismertetése

3.1. *Méréshez használt berendezés bemutatása*

A szimulációs eredmények validálásához egy laboratóriumi berendezés lett felépítve, melyet a 2. ábra mutat be. A mérőberendezés egy 1 literes üvegreaktorból, egy számítógép vezérelt IKA típusú keverőmotorból, valamint CAD ábrák alapján 3D nyomtatóval készített műanyag keverőelemekből áll. A nyomaték mérő szenzor a keverőelemet forgató motorba beépítve található, így a mért nyomatékból, valamint a szögsebességből kiszámítható a villamos energiaszükséglet. A nyomaték mérését különböző lapátszámú turbinakeverők esetén, széles fordulatszám tartományon végeztem el és a keverőmotor által felhasznált energia is regisztrálva lett.



2. ábra: Méréshez használt laboratóriumi keverő berendezés

3.2. A kevert berendezés CFD modelljének megalkotása

A modellt a COMSOL Multiphysics Rotating Machinery, forgó elemek mozgását leíró egyenletekkel kiegészített k - ε turbulencia modell (Turbulent Flow) épül fel. Az alkalmazott modell részletes leírása megtalálható Kumaresan 2005-ös publikációjában [54]. Az általunk használt modell a következő mérlegegyenleteket alkalmazza a szimuláció során:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[\rho l + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)l - \frac{2}{3}\rho k l \right] + F \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + \rho \varepsilon \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + c_{e1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - c_{e2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad , \quad \varepsilon = ep \quad (10)$$

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

$$P_k = \mu_T \left[\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)^2 \right] - \frac{2}{3}\rho k \nabla \cdot u \quad (12)$$

$$dx = dx(r_{bp}, \omega, t) \quad (13)$$

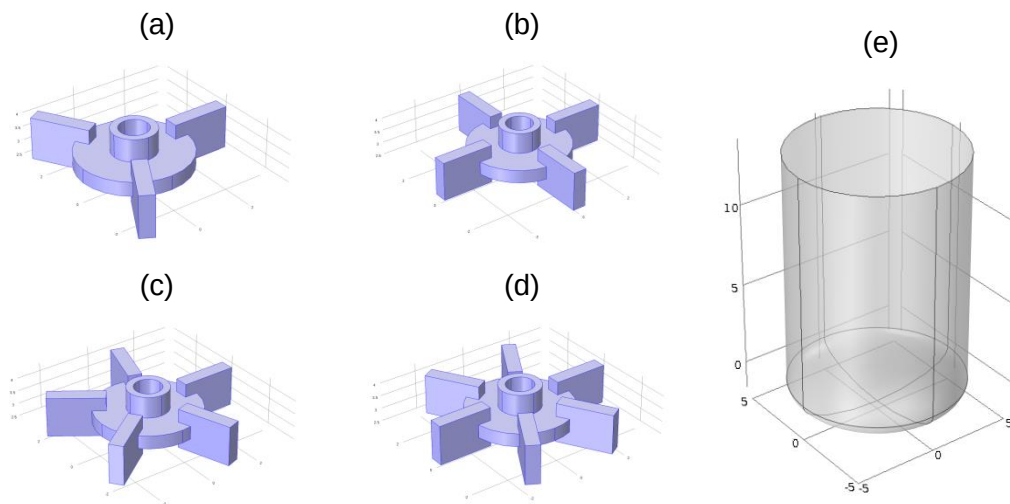
$$\frac{d\omega}{dt} = w \quad (14)$$

A felsorolt egyenletek közül a (7)-(8) alkotják a Navier-Stokes egyenletet, a (13)-(14) pedig a forgó elem mozgását írják le. A k turbulens kinetikus energiának és az ε turbulens kinetikus energiadiSSIPáció sebességének a megváltozását a (9)-(10) írják le. A (11) a turbulens viszkozitás modellezésére található a programban, míg a (12) egyenlet írja le a turbulens kinetikus energia fejlődését.

A kutatómunka során a tartályban kialakult sebességtér homogenitása, ennek eléréshez szükséges villamos energiaigény, a keverési idő, valamint a Newton-szám meghatározása alapján hasonlítjuk össze a vizsgált keverőelemeket.

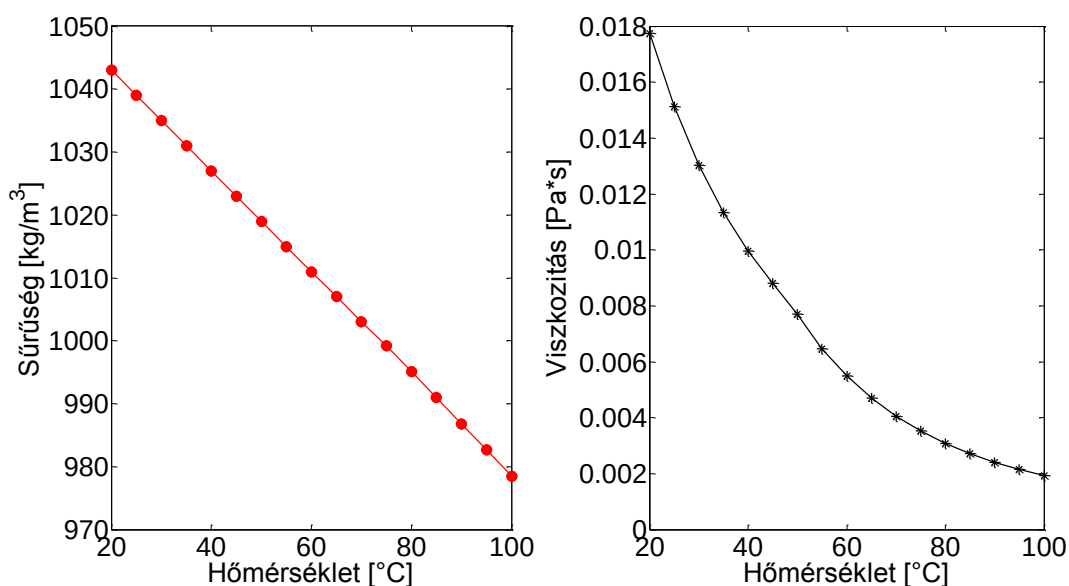
A 3. ábra mutatja be a vizsgált turbinakeverők, és tartály geometriai kialakítását. A vizsgált berendezést három dimenzióban képeztük le, mivel így tudunk a valósághoz legjobban hasonlító modellt felépíteni. Három dimenzióban reális berendezések is modellezhetők, és lehetővé teszi aszimmetrikus keverőelemek modellezését. Azonban a harmadik térdimenzió alkalmazása valamint a részletesebb felbontás miatt növekszik

szimulációk elvégzéséhez szükséges számítási idő és erőforrásigénye, a kisebb térdimenziójú modellekhez képest.



3. ábra: Vizsgált turbinakeverők (a) három-, (b) négy-, (c) öt-, (d) hatlapátos), valamint (e) a vizsgálati berendezés geometriai leképezése

A kísérleti berendezésben etilén-glikol keverését vizsgáltuk, így az anyagi tulajdonságok - többek között a sűrűség és viszkozitás - hatása a keveredésre is vizsgálhatóvá vált a berendezésben. Az alkalmazott közeg sűrűségének és viszkozitásának a hőmérséklet szerinti megváltozását mutatja be a 4. ábra. Látható, hogy az etilén-glikol viszkozitása a vizsgált hőmérséklettartományban (20-90 °C) jelentősen, egy nagyságrendet csökken a hőmérséklet növelésével.



4. ábra: Etilén-glikol sűrűségének és viszkozitásának hőmérsékletfüggése

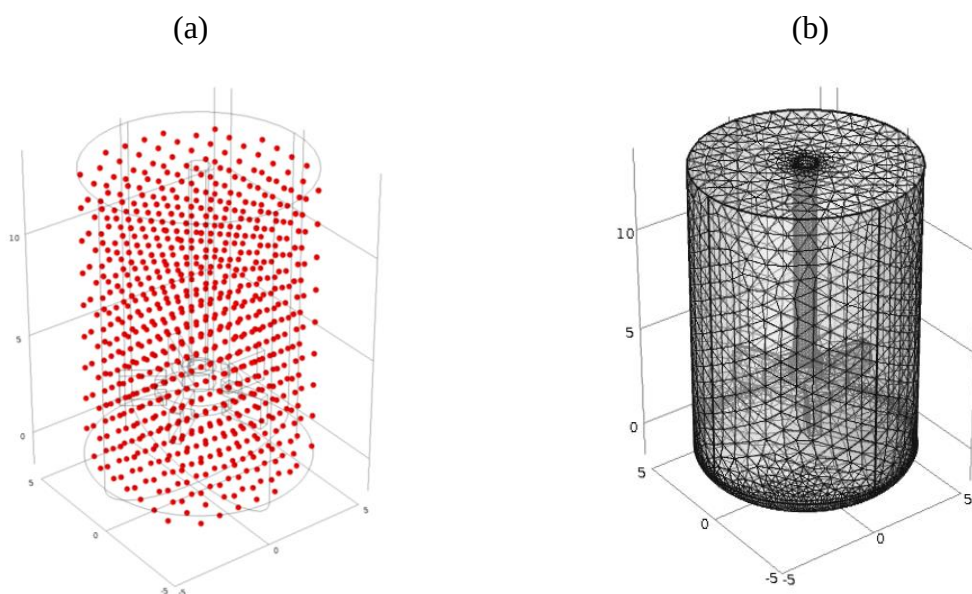
Az elkészített modellt 10 másodperc időtartamig futtattam, mivel ez alatt az idő alatt egy viszonylag állandósult (kvázi-stacioner állapot) sebességtér alakul ki a kísérleti berendezés. A modell megoldását könnyítve a fordulatszám elérését ugrásfüggvénnyel oldottam meg, oly módon, hogy 1 másodperc elteltével érje el a keverő a maximális fordulatszámot. Így nem nulláról ugrunk egy lépésben a vizsgált fordulatszámra – mint a valóságban – hanem fokozatosan emeljük a fordulatszámot, így is könnyítve a modell megoldását numerikus megoldó módszernek.

Ahhoz, hogy a szimulátor során kapott eredményt kvantitatíve értékelni tudjuk a koordináta tengelyeket egyenként 10-10 egyenlő részre osztottuk fel, majd a kiszámolt sebességmező elemeit ezekben a metszéspontokban (1000 darab) mentettük ki a szimulációból. A szimulátorban definiált mérési pontok láthatók a 5. ábra. A 5. ábra egy példát tartalmaz a számítás során alkalmazott hálóról (mesh), mely nagyszámú (hat lapátos turbina esetében 63036 darab) elemre osztja fel a modellt.

A szimulációs vizsgálatok a következő specifikációjú számítógépen lettek elvégezve:

- processzor: Intel Core CPU, i7-2600, 3,40 GHz, négy magos processzor;
- memória: 4 GB;
- operációs rendszer típusa: Windows 7 Professional, 64 bit.

A szimulációk elvégzéséhez szükséges számítási idő átlagosan 2-3 nap volt.



5. ábra: (a) A sebességi értékek exportálásához definiált „mérési” pontok, valamint (b) az alkalmazott háló (mesh)

3.3. *A kísérleti berendezésben kialakult áramlási képek vizsgálata*

A numerikus áramlástani szimulációk biztosítják számunkra, hogy beleláthassunk a tartályba, és megvizsgálhassuk az ott kialakult áramlási képeket. A 6. ábra mutatja ezeket az áramlási képeket háromlapátos turbinakeverő esetén, 20 és 90 °C hőmérsékleten, 50, 250, és 500 1/min fordulatszámokon. Jól látható, hogy az alacsonyabb fordulatszámokon a keverő szinte csak a keverő magasságában keveri a folyadékot, míg magasabb fordulatszámon az egész tartályban megvalósul a keveredés, ami a rendszer homogenitásának növekedését is jelenti. Észrevehető, hogy a magasabb hőmérsékleten, így az alacsonyabb viszkozitás esetén a keverőelem alatt kialakul egy sűrű örvény, mely azért jöhet létre, mivel az alacsonyabb viszkozitású folyadékot a keverőelem nem képes a felsőbb régiókba „felkeverni”. Továbbá látható, hogy a felsőbb régiókban magasabb hőmérsékleten homogénebb, több rendezettebb örvény alakul ki mely segít a keverés homogenitását megvalósítani.

A 7. ábra hatlapátos turbinakeverő esetén ábrázolja a tartályban kialakult sebességtér áramlási képét 20 és 90 °C hőmérsékleten, 50, 250, és 500 1/min fordulatszámokon. Itt észrevehető, hogy már a 250 1/min fordulatszámon is jelentős a rendszer kevertségének növekedése.

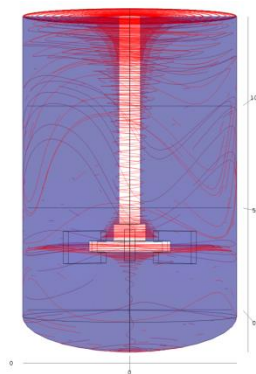
3.4. *Sebességtér homogenitásának vizsgálata hisztogramok alapján*

A sebességtér homogenitásának vizsgálatát a fentebb említett (5. ábra) 1000 ponton kialakult sebességvektorokkal végeztem el. Ahhoz hogy, valós képet kaphassunk a tartályban kialakult sebességtérrel, nem elég a legutolsó időpillanat esetén vizsgálni a tartályt belső áramlási viszonyait. Ezért minden fordulatszám esetén kiszámítottuk a keverőlapát, egy körbefordulásához szükséges időintervallumot, és ezen időintervallum alatt kialakult sebességértékek átlagát ábrázoltuk a hisztogramokon. A logaritmikus abcisszán a tartályban kialakuló sebességértékek, az ordináta tengelyen pedig ezeknek a sebességeknek a gyakorisága található.

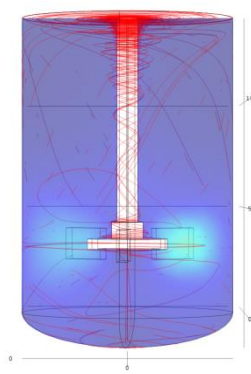
(a)

(b)

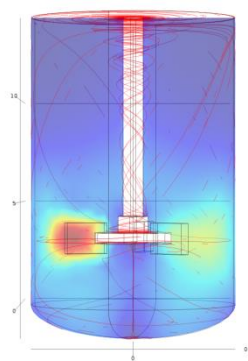




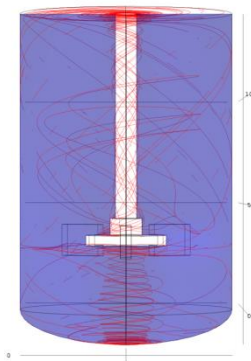
(c)



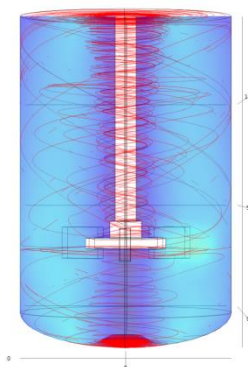
(d)



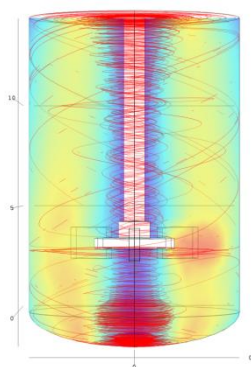
(e)



(f)

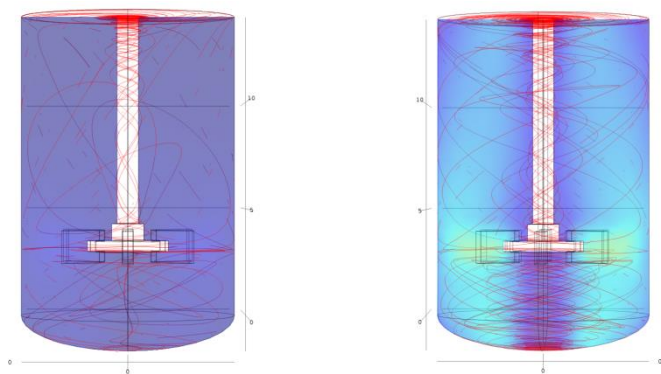


(a)



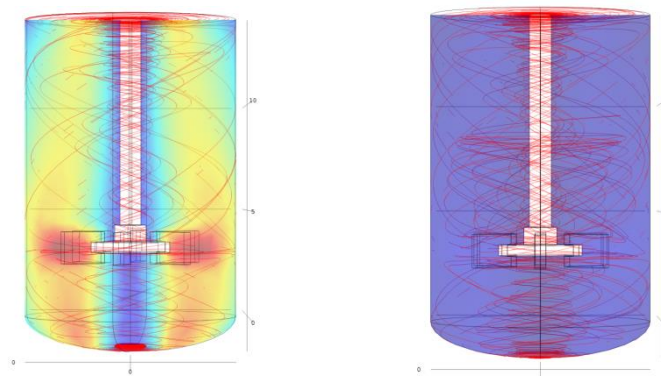
(b)

6. ábra: A tartályban 10 sec után kialakult sebességtér ábrázolása háromlapátos turbinakeverő esetén (a) $T = 20\text{ °C}$ $n = 50\text{ 1/min}$, (b) $T = 20\text{ °C}$ $n = 250\text{ 1/min}$, (c) $T = 20\text{ °C}$ $n = 500\text{ 1/min}$, (d) $T = 90\text{ °C}$ $n = 50\text{ 1/min}$, (e) $T = 90\text{ °C}$ $n = 250\text{ 1/min}$, (f) $T = 90\text{ °C}$ $n = 500\text{ 1/min}$



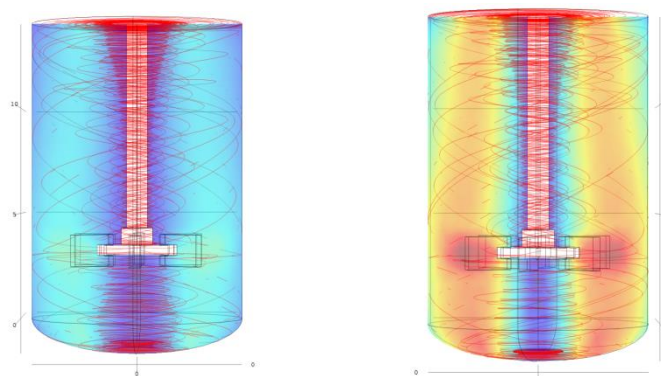
(c)

(d)



(e)

(f)



7. ábra: A tartályban 10 sec után kialakult sebességtér ábrázolása hatlapátos turbinakeverő esetén (a) $T = 20\text{ °C}$ $n = 50\text{ 1/min}$, (b) $T = 20\text{ °C}$ $n = 250\text{ 1/min}$, (c) $T = 20\text{ °C}$ $n = 500\text{ 1/min}$, (d) $T = 90\text{ °C}$ $n = 50\text{ 1/min}$, (e) $T = 90\text{ °C}$ $n = 250\text{ 1/min}$, (f) $T = 90\text{ °C}$ $n = 500\text{ 1/min}$

Ahhoz, hogy könnyebben lehessen értelmezni a diagramokon látható görbéket az átlag értékek (MV), valamint standard normális szórások (NSTD) is meghatározásra kerültek a különböző keverőelemek esetén, a vizsgált fordulatszámokon és hőmérsékleten. Az ábrákon az átlagértékeket, melyek a tartályban kialakult átlagos sebességet adják meg, MV-vel jelöltem. NSTD rövidítéssel pedig a standard normális szórást, mely azt mutatja meg, hogy a tartályban

mennyire homogén sebességtér alakult ki. Megvizsgáltam három-, négy-, öt-, valamint hatlapátos turbinakeverő esetén a tartályban kialakult sebességtér homogenitását, valamint a hőmérséklet (20-90 °C tartományban 10 °C hőmérsékletenként) - így az anyagi tulajdonságok, például a viszkozitás - és a fordulatszám (50-500 1/min fordulatszám tartományban 50 1/min fordulatonként) hatását a rendszer homogenitására. A dolgozatban az eredmények 20 °C, 50 °C, és 90 °C hőmérsékleten, valamint hőmérsékletenként 50 1/min, 250 1/min és 500 1/min fordulatszámokon kerülnek bemutatásra.

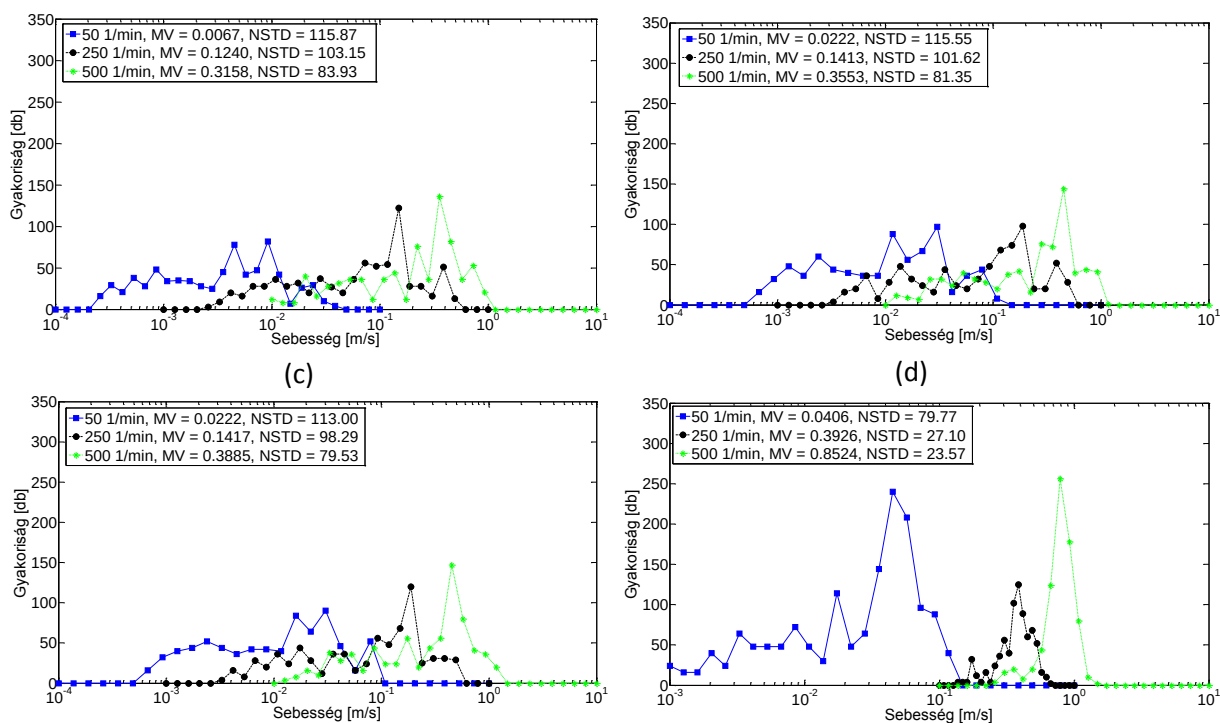
Először bemutatnám, hogy a fordulatszámoknak milyen hatása van az egyes hőmérsékleteken kialakult sebességtér hatására. A 8. ábra mutatja be, hogy 20 °C hőmérsékleten a különböző lapátszámmal rendelkező turbinakeverők milyen kevertséget eredményeznek 50, 250, 500 1/min fordulatszámokon. Jól látható, hogy a fordulatszám emelkedésével minden lapátszám esetén nő az MV, így a tartályban kialakult maximális sebesség is. Összehasonlítva az NSTD értékeket kivehető, hogy a három, négy, valamint öt lapátszámú turbinakeverők esetén, ha a fordulatszámot 50 fordulatról 500 fordulatra emeljük percenként, vagyis megtízszerezzük, akkor a tartályban kialakult sebességtér homogenitása körülbelül 33 %-kal fog javulni. Ez az arány a hatlapátos turbinakeverő esetén a legjelentősebb, itt 70 % javulást eredményez a fordulatszám emelése.

A 9. ábra 50 °C hőmérsékleten mutatja be a tartályban kialakult sebességtér homogenitás vizsgálatának az eredményét. A hőmérséklet emelésével csökken a viszkozitása is a kevert anyagnak. Emiatt, nem tud kialakulni olyan széles sebességtartomány, mint alacsonyabb hőmérsékleten, így ebben az esetben jobb homogenitást lehet elérni alacsonyabb fordulatszámon, mint az előző esetben. Valamint az is észrevehető, hogy ezen a hőmérsékleten nem alakul ki a hatlapátos turbinakeverő esetén majdnem kétszer akkora javulás a kialakult sebességtér homogenitásában, mint 20 °C hőmérsékleten. 50 °C hőmérsékleten minden esetben körülbelül 50 % javulást tapasztalunk tízszeres fordulatszám növelés hatására.

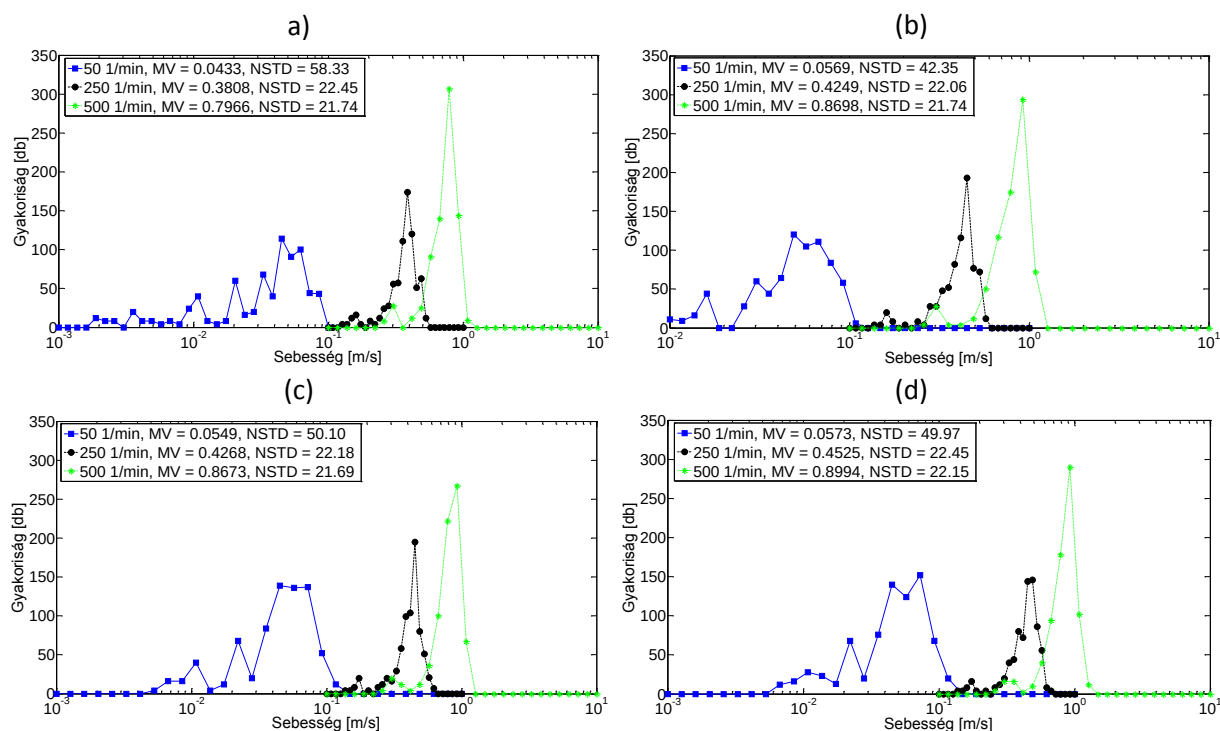
Mindhárom hőmérséklet esetében észrevehető, a fordulatszám 50-ről 250 1/min-ra emelésével a fordulatszámot, egy nagyságrenddel emelkedik a tartályban kialakult legmagasabb sebesség értéke. Ha a fordulatszámot tovább növeljük, akkor ez a körülbelül tízszeres növekedés a sebességben, csupán kétszeresre fog változni. Tehát elmondható, hogy a fordulatszám változtatás hatása alacsonyabb fordulatszámon jelentősebb.

(a)

(b)



8. ábra: A tartályban kialakult sebességtér homogenitásának vizsgálata 20 °C hőmérsékleten, (a) három, (b) négy, (c) öt, és (d) hat lapátos turbinakeverő esetén

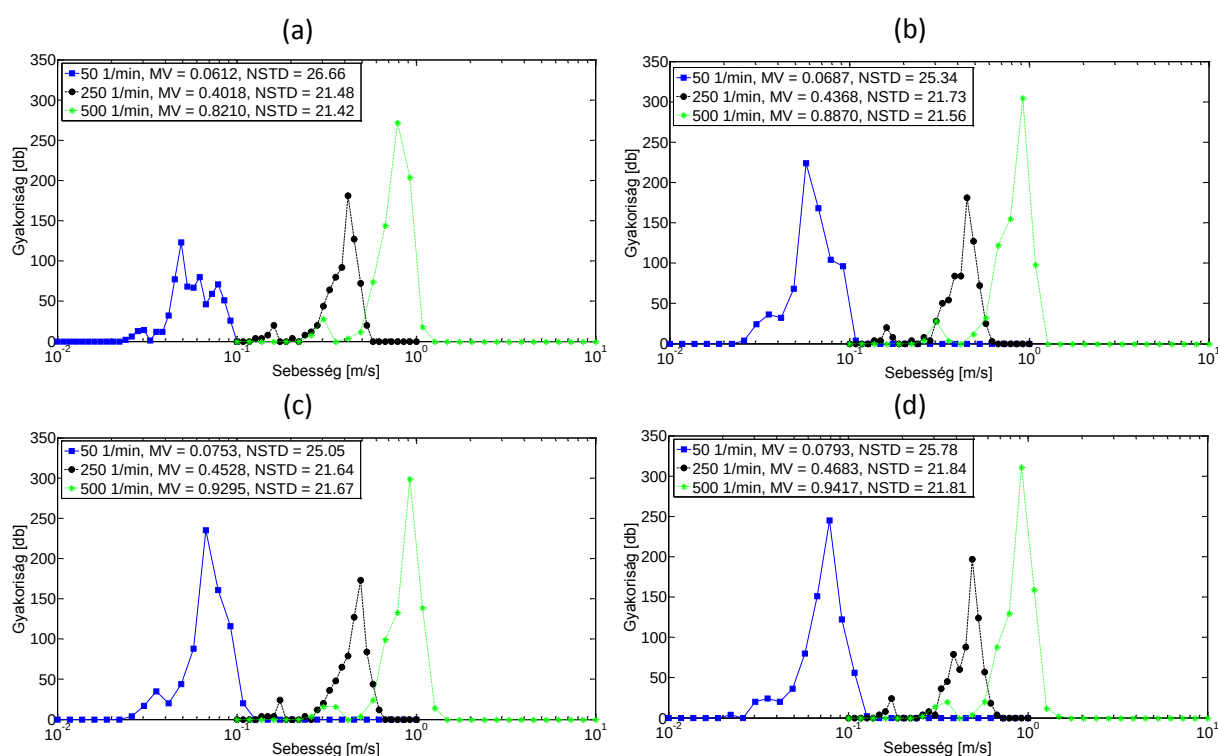


9. ábra: A tartályban kialakult sebességtér homogenitásának vizsgálata 50 °C hőmérsékleten, (a) három, (b) négy, (c) öt, és (d) hat lapátos turbinakeverő esetén

A 10. ábra az általunk vizsgált legmagasabb hőmérsékleten, 90 °C-on és így a legalacsonyabb viszkozitáson mutatja be a fordulatszám hatását az különböző kialakítású

keverőelemek esetén. Ahogy az várható volt, a fordulatszám hatása a tartályban kialakult sebességtér homogenitására szinte elenyésző. Az eddig látott homogenitás javulás a fordulatszám tízszeres emelkedése mellett (20 °C-on akár 70 %-os, 50 °C-on pedig körülbelül 50 %-os) ezen a hőmérsékleten a legjobb esetben is csupán 20 %-os.

A 11-12-13. ábrákon a lapátszám hatását szeretném bemutatni a kevertségre, különböző fordulatszámok esetén. A 11. ábra mutatja be az 50 1/min fordulatszámra végzett vizsgálatok eredményét. Jól látható az MV és NSTD értékeken, hogy viszkozitás tartományban a legmagasabb sebességet valamint a legjobb homogenitást is a legnagyobb lapátszámmal rendelkező keverőelem mutatja.

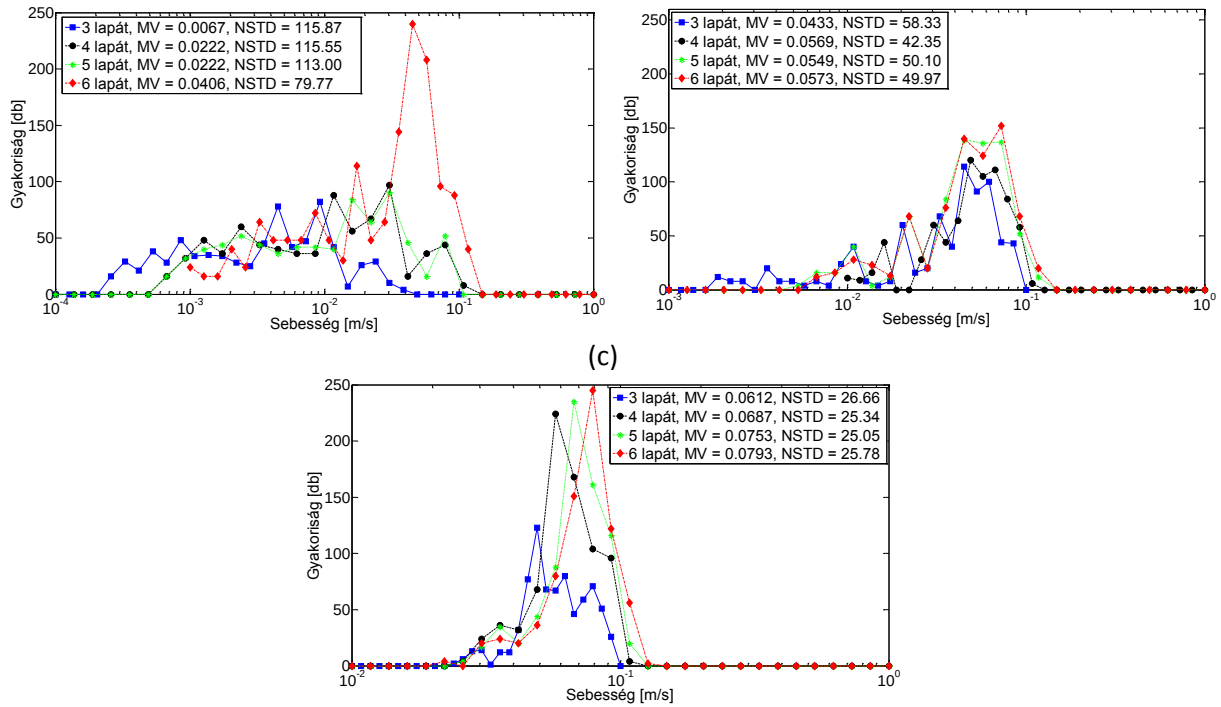


10. ábra: A tartályban kialakult sebességtér homogenitásának vizsgálata 90 °C hőmérsékleten, (a) három, (b) négy, (c) öt, és (d) hat lapátos turbinakeverő esetén

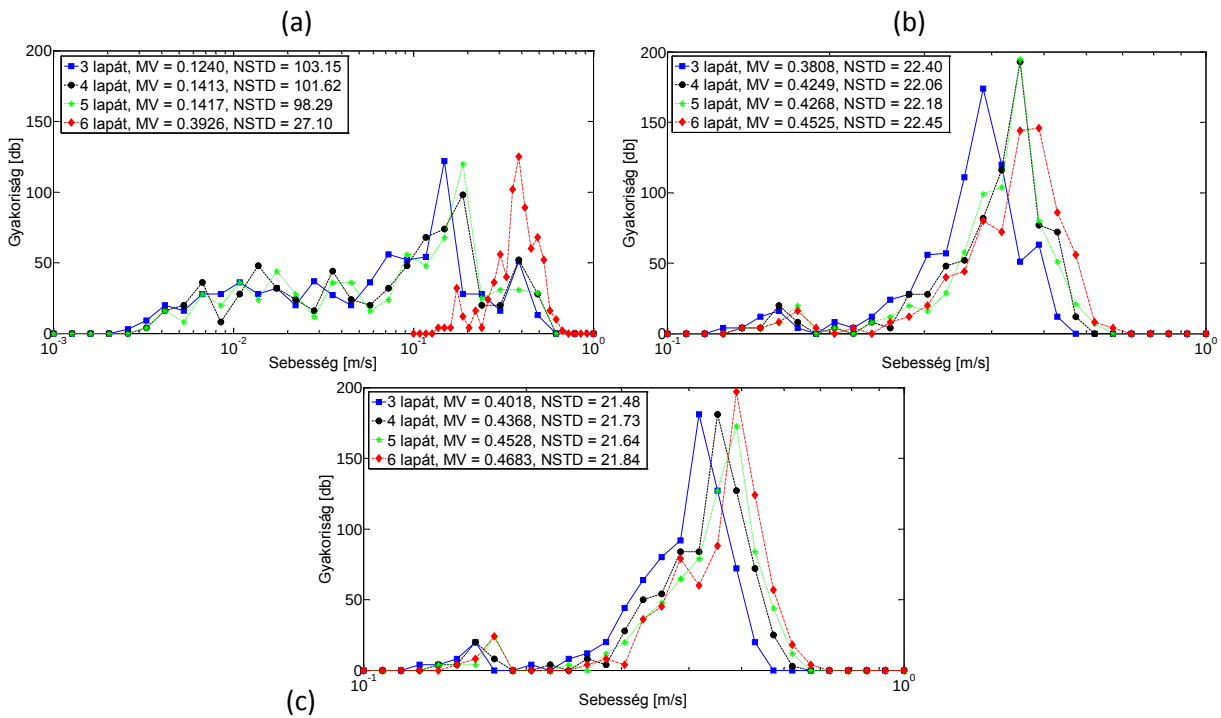
Viszont az is látható, hogy a hőmérséklet emelkedésével a lapátszám hatása csökken, a kialakult sebességtér homogenitására. Alacsony fordulatszámra észrevehető, hogy a három-, négy, és öt lapátos kialakítás szinte ugyanolyan homogenitást eredményez, míg a hat lapátos turbinakeverő viszont sokkal jobb kevertséget képes kialakítani. A 12. ábra, valamint a 13. ábra a 250 valamint az 500 1/min-es fordulatszámra mutatja be a lapátszám növelésének hatását a tartályban kialakult sebességtér homogenitására. Itt is elmondhatók azok a tendenciák, mint a 20 °C hőmérsékletű esetben.

(a)

(b)

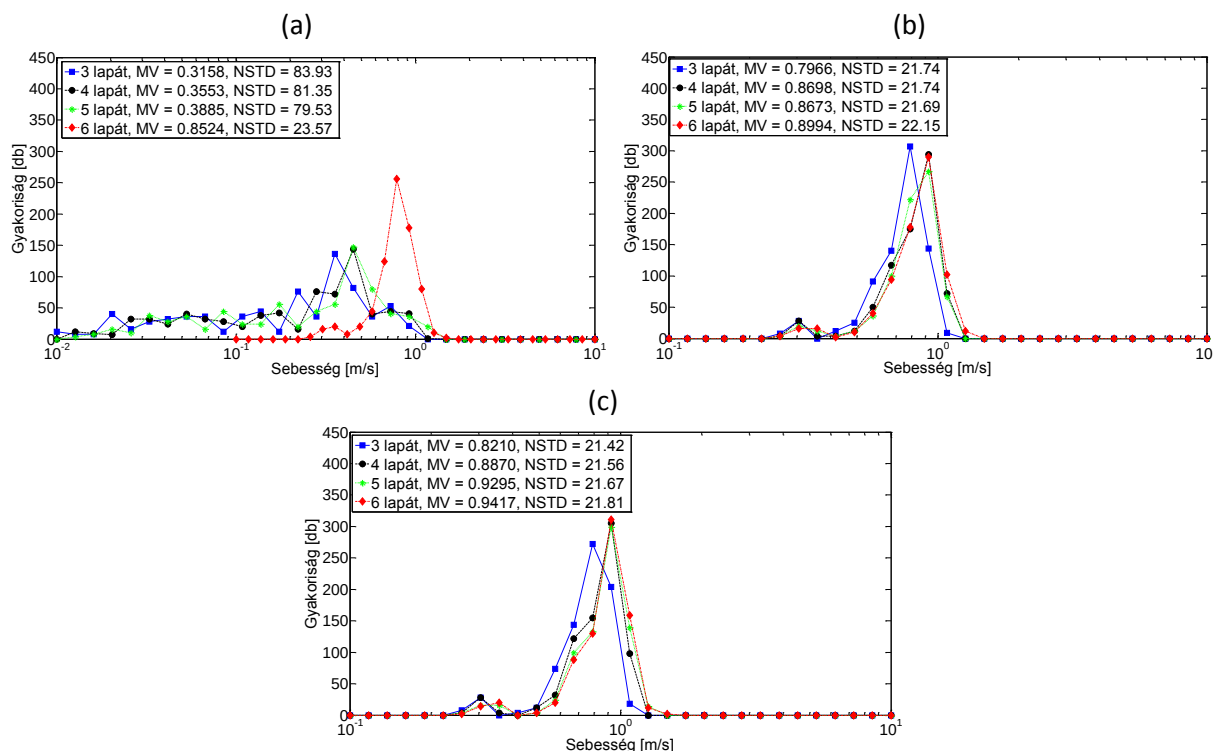


11. ábra: A lapátszám hatásának vizsgálata a tartályban kialakult sebességtér homogenitására 50 1/min fordulatszámon, (a) 20 °C, (b) 50 °C, (c) és 90 °C esetén



12. ábra: A lapátszám hatásának vizsgálata a tartályban kialakult sebességtér homogenitására 250 1/min fordulatszámon, (a) 20 °C, (b) 50 °C, (c) és 90 °C esetén

Így összegezve kijelenthető, hogy az alacsony viszkozitású anyagok keverésénél a tartályban kialakult sebességtér homogenitására a lapátszám növelése nincs jelentős hatással.



13. ábra: A lapátszám hatásának vizsgálata a tartályban kialakult sebességtér homogenitására 500 1/min fordulatszámon, (a) 20 °C, (b) 50 °C, (c) és 90 °C esetén

3.5. Keverési idő meghatározása

Az előző fejezetben bemutatott hisztogramokon alapuló kevertesség összehasonlítása az iparban és a kutatásokban nem alkalmazott széleskörűen. Annak érdekében, hogy a különböző keverőelem kialakításokat mennyiségileg összehasonlítsák, definiálták a keverési időt majd ennek meghatározására a korábban ismertetett módszerek (2.4.1. fejezet) kidolgozását javasolták [55]. A keverési időt úgy határoztam meg, hogy vizsgáltam, hogy a berendezés egy specifikált részébe pillanatszerűen bevezetett hőáram, milyen módon változtatja meg a rendszer hőmérsékletét. A berendezés modelljét ennek megfelelően egy hőmérleggel egészítettem ki. A hőáramot tartály felső lapjának egy pontjában végeztem, mely 0,2 s időintervallum alatt került bevezetésre. Keverési időnek esetünkben, azt az időt tekintjük, amely ahhoz szükséges, hogy a kísérleti berendezés egyes pontjaiban mérhető hőmérséklet értékek szórása 2,5 %-nál kisebb legyen.

Az 1. táblázat mutatja be az egyes keverőelemek által eredményezett keverési időket 20 °C, 50 °C, 90 °C. Jól látható, hogy minden esetben a fordulatszám emelése – főként alacsony fordulatszám tartományban – jelentős hatással bír a keverési időre. 20 °C hőmérsékleten 50 és

250 1/min fordulatszám tartományban a keverési idő legalább kétszer nagyobb, mint magasabb hőmérsékleteken. Ez betudható a már bemutatott alacsony hőmérsékleten és alacsony fordulatszámon megfigyelhető alacsony homogenitásnak. Magas fordulatszámok esetén a keverési idő nem függ jelentős mértékben a viszkozitástól, valamint megfigyelhető, hogy a lapátszám növelése a legtöbb esetben javítja a keverőelemmel elérhető keverési időt. Mivel a keverési idők alapján hasonló következtetéseket vontunk le, mint az előző esetben, így elmondható, hogy az általunk javasolt, hisztogramokon alapuló módszer is alkalmazható a különböző geometriájú keverőelemek által kialakított homogenítások mennyiségi összehasonlítására.

1. táblázat: Keverési idő összehasonlítása

Hőmérséklet (°C)	Keverési idő (sec)								
	20			50			90		
Fordulatszám (1/min)	50	250	500	50	250	500	50	250	500
Háromlapátos turbinakeverő	217,6	51,1	15,9	37,6	12,7	10,2	31,9	15,1	11
Négylapátos turbinakeverő	92,1	44,3	13,4	26,2	12,6	9,7	28,6	14,0	10,9
Ötlapátos turbinakeverő	226,5	38,4	12,6	27,5	11,4	8,9	28,3	14,1	10,5
Hatlapátos turbinakeverő	69,2	9,8	8,1	28,8	13,0	8,6	36,2	13,8	8,9

3.6. Keverés energetikai vizsgálata

A keverő energetikai analízise során két vizsgálatot végeztünk el. Első lépésben a villamos energiaszükségletet számítottuk ki. Ehhez szimulációs oldalról a (15)-tel történt a teljesítmény meghatározása:

$$P = r \cdot \omega \cdot c_f \cdot \left(\iint \frac{\rho}{2} \cdot u^2 dx dy \right) \quad (15)$$

A zárójelben lévő felületi integrál értékét a szimulációs programból a keverőlapát felületén történő integrálással tudtuk kinyerni (F erő). Ezután a keverőlapátok számával valamint az erőkar hosszával (r) történő szorzással nyomatékot kapunk. Ezt a szögsebességgel megszorozva kapható a teljesítmény. Az egyenletben szereplő c_f mennyiség egy dimenziómentes ellenállási faktor, amely az irodalomban több helyen is megjelenik, mint

olyan mennyiség, amit mindenképpen mérésel kell meghatározni. Ez a faktor összefüggésben van a kevert anyag tulajdonságaival. Számítása az (17) szerint történhet:

$$c_f = x \cdot Re^2 + y \cdot Re + z \quad (16)$$

Ezeket a faktorokat a mérési eredmények segítségével határoztuk meg. MATLAB programban egy globális keresési algoritmus (PSO) használatával minimalizáltuk a négyzetes hiba összeget [56], és így illesztettük a három paramétert a c_f faktor számításához. Így számolható lesz a teljesítmény a szimulációs eredmények alapján is. Az 2. táblázat a kapott konstansok értékeit szemlélteti különböző keverőelemeknél. Az egyenletben a Re a dimenziómentes Reynolds-szám, mely szimulációs eredményeken alapul, ahol egy keverőlapáton mért felületi integrállal lett meghatározva 7. egyenlet

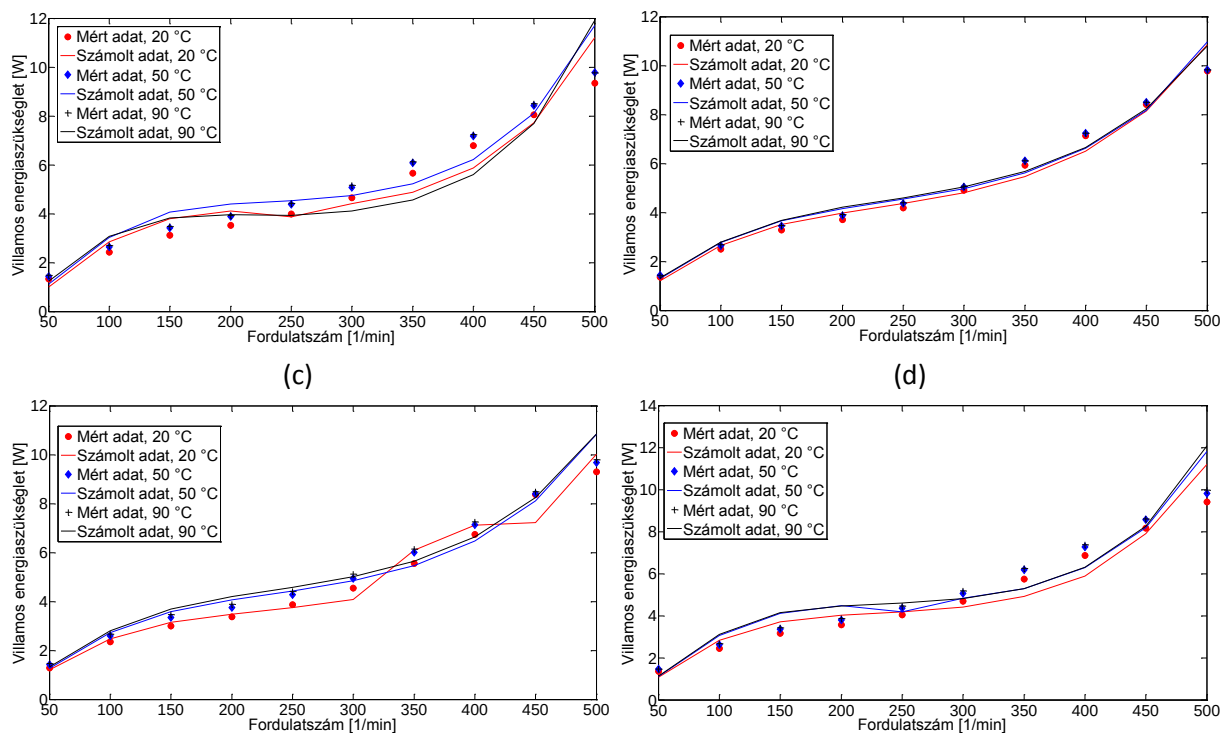
2. táblázat: (16) során alkalmazott paraméterek értéke a vizsgált turbinakeverők esetén

	Háromlapátos turbinakeverő			Négylapátos turbinakeverő		
Paraméter\Hőmérséklet (°C)	20	50	90	20	50	90
x	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$3.94 \cdot 10^{-5}$	$4.77 \cdot 10^{-6}$	$8.99 \cdot 10^{-5}$	$1.77 \cdot 10^{-5}$	$1.85 \cdot 10^{-6}$
y	$-6.71 \cdot 10^{-2}$	$-3.01 \cdot 10^{-2}$	$-1.08 \cdot 10^{-2}$	$-3.35 \cdot 10^{-2}$	$-1.50 \cdot 10^{-2}$	$-4.88 \cdot 10^{-3}$
z	1.26	1.43	1.75	1.03	1.16	1.77
	Ötlapátos turbinakeverő			Hatlapátos turbinakeverő		
Paraméter\Hőmérséklet (°C)	20	50	90	20	50	90
x	$1.11 \cdot 10^{-4}$	$7.19 \cdot 10^{-5}$	$1.96 \cdot 10^{-6}$	$1.59 \cdot 10^{-4}$	$4.15 \cdot 10^{-5}$	$4.39 \cdot 10^{-6}$
y	$-3.93 \cdot 10^{-2}$	$-3.08 \cdot 10^{-2}$	$5.04 \cdot 10^{-3}$	$-6.08 \cdot 10^{-2}$	$-3.11 \cdot 10^{-2}$	$-1.01 \cdot 10^{-2}$
z	1.19	1.20	1.26	$7.12 \cdot 10^{-1}$	$8.14 \cdot 10^{-1}$	$8.53 \cdot 10^{-1}$

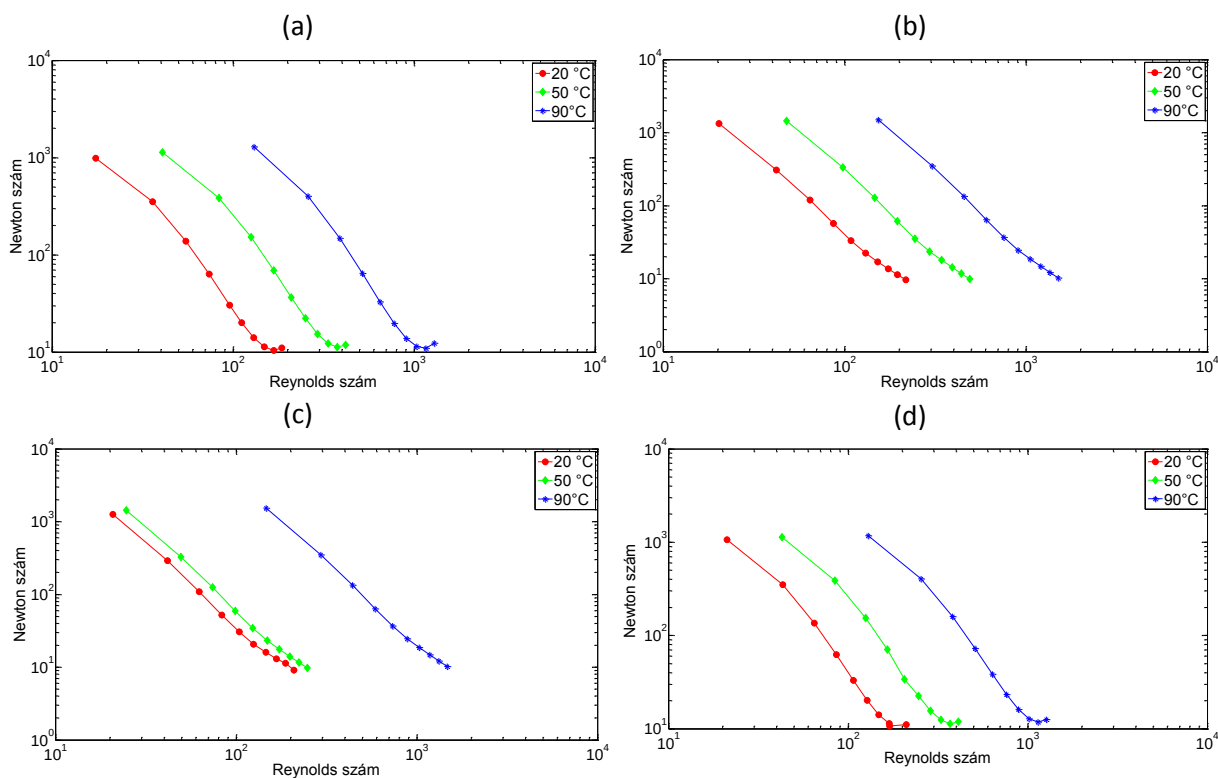
A 14. ábra mutatja be az egyes turbinakeverők esetén a fordulatszámnak, a mért és a számított villamos energiaszükségletekre való hatását. Az egyezések alapján kijelenthető, hogy a készített CFD modell alkalmas a keverő elektromos energiaigényének a meghatározására. Mint az látható volt már, a hatlapátos turbinakeverő esetén, ha tízszeresére emeljük a fordulatszámot, akkor a tartályban kialakuló sebességtér homogenitása jelentősen megváltozott, mely során a keverőelem energiaszükséglete 2 W-ról 14 W-ra emelkedik.

(a)

(b)



14. ábra: (a) Három, (b) négy, (c) öt, és (d) hat lapátos turbinakeverő mért és számolt villamos energiaszükséglete különböző fordulatszámokon



15. ábra: (a) Három, (b) négy, (c) öt, és (d) hat lapátos turbinakeverő esetén meghatározott Newton számok

Viszont azt is láthatjuk, hogy a legtöbb esetben 200-400 1/min tartományban a villamos energiaszükséglet nem emelkedik jelentősen, így ezen a tartományon bátran növelhetjük a

keverő fordulatszámát. A másik vizsgálati módszer a keverőelemek energetikai minősítésére a Newton szám (Power number) meghatározása. A Newton szám a 6. egyenlet alapján számítható. A 15. ábra tartalmazza a Newton-szám ábrázolását a Reynolds-szám függvényében.

Az 15. ábra segítségével tekinthető át a viszkozitás (Re) hatása a keverőelem teljesítményére (Ne). Látható, hogy a viszkozitás csökkentésére növekszik a keverőelem teljesítményigénye is. Az irodalomban [56] is hasonló lefutású görbék találhatók turbinakeverők esetén, mely szintén azt bizonyítja, hogy a szimulátorban leképezett modell megfelelően tükrözi a valóságot.

4. Összefoglalás

Dolgozatban a kapcsolódó irodalom bemutatása után, ismertettem a kidolgozott valós szakaszos üstreaktor CFD modelljét, három dimenzióban. A különböző lapátszámú (három, négy, öt, hat) turbinakeverők esetén megvizsgáltam a fordulatszám, a lapátszám valamint a viszkozitás hatását. A kísérleti berendezés kialakuló tér homogenitásának minősítésére az abban kialakuló sebességi tér hisztogramokon való ábrázolását javasoltam. Meghatároztuk a keverők villamos energiaszükségletét, valamint valós rendszeren elvégzett mérésekkel validáltuk. A keverőelemek kvantitatív összehasonlítása érdekében meghatároztuk a keverési időket, valamint a Newton-szám-Reynolds-szám diagramokat is az egyes keverőkre.

A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy az általunk alkalmazott hisztogramokon való keverőelem összehasonlítás alapján kapott eredmények megfelelő egyezést mutatnak az iparban és a kutatásokban elterjedt módszerekkel elérhető eredményekkel. Megállapítottuk, hogy a fordulatszámnak, valamint a hőmérsékletnek, és így a viszkozitásnak is jelentős hatása van a tartályban kialakuló sebességtér homogenítására. A lapátszám növelése is nagy befolyással van a tartály kevertségére. Megállapítottuk, hogy a fordulatszámnak a 250 fordulat/perc alatti tartományban nagyobb hatása van, mint a magasabb fordulatszámok esetén.

A tudományterület még rengeteg kutatást rejt magában. További cél, a vizsgált keverőelem geometriák számának növelése, valamint áramlástörők alkalmazásának vizsgálata. A reaktorba történő injektálási csomák beépítésével szemléltetésre kerülhet a keverőelemek hatása folyamatos reaktorokban is. Távlati cél a modellbe komponens és hőmérleg beépítése, mely így alkalmas lesz a reaktorban többféle reakció hatására (elsőrendű, magasabb rendű, egyensúlyi, autokatalitikus, stb.) kialakuló hőmérsékleti kép, valamint komplex reakciórendszerek vizsgálatára. Legvégül a keverési index, valamint a kiszámított beruházási és üzemeltetési költségek összevetésével kiválaszthatóvá válik az optimális keverőelem az adott feladatra.

Jelölésjegyzék

ρ	sűrűség	$\frac{kg}{m^3}$	S	nyíróerő tenzor	
u	sebességvektor	$\frac{m}{s}$	∇	nabla - differenciáloperátor	
η	viszkozitás	Pas	F	erővektor	N
η_t	turbulens viszkozitás	Pas	D	Keverőelem átmérő	m
T	az abszolút hőmérséklet	K	T	Tartály átmérő	m
P	nyomás	Pa	Z	Folyadékszint	m
C_p	hőkapacitás	$\frac{J}{kgK}$	C	Keverőelemnek a tartály	m
k	turbulens kinetikai energia			aljától mért távolsága	
ε	energia veszteségi ráta		w	Keverőlapát szélessége	m
C_ε	konstans		p	Keverőlapát felülete	m ²
$C_{\varepsilon 1}$	konstans		n	Keverőlapát száma	
$C_{\varepsilon 2}$	konstans		g	Gravitációs gyorsulás	$\frac{m}{s^2}$
C_μ	konstans		cf	Ellenállás faktor	
σ_k	konstans		x	Konstans	
Di	diffúziós koefficiens	$\frac{mol}{m^3s}$	y	Konstans	
Ri	forrástag	$\frac{W}{m^3}$	z	Konstans	
δ_{ts}	időfüggő koefficiens	$\frac{1}{m^3}$	ω	Szögsebesség	$\frac{rad}{s}$
N	fordulatszám	$\frac{1}{min}$			
t	idő	s			

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalomjegyzék

- [1] O. Levenspiel: *Chemical Reaction Engineering*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1999
- [2] Fonyó Zs., Fábry Gy: *Vegyipari művelettani alapismeretek*, Nemzeti Tankönyvkiadó, 2004
- [3] M. Taghavi, R. Zadghaffari, J. Moghaddasa, Y. Moghaddas: *Experimental and CFD investigation of power consumption in a dual Rushton turbine stirred tank*, Chemical Engineering Research and Design, 89, 280-290, 2011
- [4] A. Kolmogorov: *The equations of turbulent motion in an incompressible fluid*, Izv. Sci.USSR Phys., 6, pp. 56-58. 1942.
- [5] O. Marxen, T. E. Magin, E. S. G. Shaqfeh, G. Iaccarino: *A method for the direct numerical simulation of hypersonic boundary-layer instability with finite-rate chemistry*, Journal of Computational Physics, 15, 572-589, 2013
- [6] G. Oyarzun, R. Borrell, A. Gorobets, O. Lehmkuhl, A. Oliva: *Direct Numerical Simulation of Incompressible Flows on Unstructured Meshes Using Hybrid CPU/GPU Supercomputers*, Procedia Engineering, 61, 87-93, 2013
- [7] Y. Maruyama, T. Tamura, Y. Okuda, M. Ohashi: *LES of fluctuating wind pressure on a 3D square cylinder for PIV-based inflow turbulence*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 122, 130-137, 2013
- [8] A. M. Kempf, S. Wysocki, M. Pettit: *An efficient, parallel low-storage implementation of Klein's turbulence generator for LES and DNS*, Computers & Fluids, 60, 58-60, 2012
- [9] H. Peng, W. Qui, S. Ni: *Effect of turbulence model on RANS computation of propeller vortex flow*, Ocean Engineering, 72, 304-317, 2013
- [10] K. E. Ch. Vidyasagar, R. Varma: *Design and development of caged ball heart valve using solid works*, Proceedings of the 2013 International Conference on Biology and Biomedicine, 2013

- [11] M. Rybalko, E. Loth, D. Lankford: *A Lagrangian particle random walk model for hybrid RANS/LES turbulent flows*, Powder Technology, 221, 105-113, 2012
- [12] F. G. Schmitt: *About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity*, Comptes Rendus Mécanique, 335, 617-627, 2007
- [13] J.O. Hinze: *Turbulence*, McGraw-Hill, New York, 1959
- [14] H. Tennekes, J. Lumley: *A First Course in Turbulence*, MIT Press, Cambridge, 1972
- [15] L. Prandtl: *Über die ausgebildete Turbulenz*, Z. angew. Math. Mech., Vol. 5, pp. 136-139, 1925
- [16] B.S. Baldwin, H. Lomax: *Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows*, AIAA Paper, pp. 78-257, 1978
- [17] T. Cebeci, J. Cousteix: *Modeling and Computation of Boundary-Layer Flows*, Springer-Verlag, Berlin, 1999
- [18] L. Prandtl: *Über ein neues Formelsystem für die ausgebildete Turbulenz*, Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, Math-Phys. Kl., pp. 6-19, 1945
- [19] P.R. Spalart, S.R. Allmaras: *A one-equation turbulence model for aerodynamic flows*, AIAA Paper, Reno NV, pp. 92-439. 1992
- [20] T. Czibere: *Mechanische Ähnlichkeit der turbulenten Flüssigkeitsströmungen*, Publ.Univ. of Miskolc. Series C, Mechanical Engineering, Vol. 50, pp. 3-12. 1999
- [21] W. Xu, Q. Chen: *A two-layer turbulence model for simulating indoor airflow: Part I. Model development*, Energy and Buildings, 33, 613-625, 2001
- [22] Hippler, J. E.: *B.Ch.E. Thesis*, Department of Chemical Engineering, Villanova University, Villanova, Pennsylvania, 1956
- [23] Johnstone, R. E., and Thring, M. W.: *Pilot Plants, Models and Scale-Up Methods in Chemical Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1957
- [24] Rushton, J. H., Costich, E. W., Everett, H. J.: *Chemical Engineering Progress*, 46, 395, 1950
- [25] Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N.: *Transport Phenomena*, Wiley and Sons, New York, 2007, ISBN-10: 0470115394
- [26] Schlichting, H.: *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, New York, 1960
- [27] Paul E. L., Atiemo-Obeng V. A., Kresta S. M.: *Handbook of industrial mixing: science and practice*, Wiley & Sons, New Jersey. USA, 2004
- [28] Nurtono T., Setyawayan H., Altway A., Winardi S.: *Macro-instability characteristic in agitated tank based on flow visualization experiment and large eddy simulation*, Chemical Engineering Research and Design, 87, 923-942, 2009

- [29] Van de Vusse J. G.: *Mixing by agitation of miscible liquids*, Chemical Engineering Science, 4, 178-200, 1995
- [30] Spero P. M.: *Thermocouple Temperature Measurements for Twin Jet Thermal Mixing*, Master's Dissertation, University of Tennessee, USA, 2011
- [31] MacTaggart R.S., Nasr-El-Din H.A., Masliyah J.H.: *A conductivity probe for measuring local solids concentration in a slurry mixing tank*, Separations Technology, 3, 151-160, 1993
- [32] Egedy A., Varga T., Chován T.: *Particle Tracing based model validation for CFD models of stirred reactors*, Chemical Engineering Transactions, 32, 1429-1434, 2013, DOI:10.3303/CET1332239
- [33] Bader F. G.: *Modelling mass transfer and agitator performance in multiturbine fermentor*, Biotechnology and Bioengineering, 30, 37-51, 1987
- [34] R. E. Hayes, A. Afacan, B. Boulanger, P. A. Tanguy: *Experimental Study of Reactive Mixing in a Laminar Flow Batch Reactor*, Chemical Engineering Research and Design 76, p. 73-81, 1998
- [35] J. R. Bourne, S. Yu: *Investigation of micro-mixing in stirred tank reactors using parallel reactions*, Ind. Eng. Chem. Res. 33, p. 41-55, 1994
- [36] M.M. Alvarez, A. Guzmán, M. Elias: *Experimental visualization of mixing pathologies in laminar stirred tank bioreactors*, Chemical Engineering Science 60, p. 2449-2547, 2005
- [37] K. Kling, D. Mewes: *Quantitative Measurements of Micro- and Macromixing in a Stirred Vessel using Planar Laser-Induced Fluorescence*, Journal of Visualization 6, p. 165-173, 2003
- [38] Brown D. E.: *The measurement of fermentor power input*, Chemistry & Industry, 16, 684-688, 1997
- [39] Oosterhuis N. M. G., Kossen N. W. F.: *Power input measurements in a production scale bioreactor*, Biotechnology Letters, 3, 645-650, 1981
- [40] Holland I. A., Chapman F. S.: *Liquid Mixing and Processing in Stirred Tanks*, Reinhold, New York, USA, 1996
- [41] Machon V., Vlcek J., Shrivaneek J.: *Dual impeller systems for aeration of liquids: an experimental study*, Proceedings of 5th European conference on Mixing BHRA Fluid Engineering, Cranfield Institute, Bedford, UK, 155-169, 1985
- [42] Himmelstein S.: *Precision Torquemeter Readouts*, Bulletin 360D, Himmelstein & Co., USA, 1998

- [43] Chatwin S., Nienow A. W.: *Successful power measurement in agitated vessels*, Laboratory Science and Technology, September, 19, 1985
- [44] A. Kuzmin: *Computational Fluid Dynamics*, 2010
- [45] V. Árpád: *Bevezetés az áramlástan numerikus módszereibe*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, egyetemi jegyzet, Budapest, 2002
- [46] F. T. Johnson, E. N. Tinoco, N. J. Yu: *Thirty years of development and application of CFD at Boeing Commercial Airplanes*, Seattle, Computers & Fluids 34, p. 1115-1151, 2005.
- [47] M. K. Ji, T. U., J. S. Woo, Y. H. Lee, H. M. Jeong, H. S. Chung: *CFD investigation on the flow structure inside thermo vapor compressor*, Energy 35, p. 2694-2702, 2010
- [48] W. Kieffer, S. Moujaes, N. Armbya: *CFD study of section characteristics of Formula Mazda race car wings*, Mathematical and Computer Modeling 43, p. 1275-1287, 2006
- [49] S. C. P. Cheung, S. M. Lo, G. H. Yeoh, R. K. K. Yuen: *The influence of gaps of fire-resisting doors on the smoke spread in building fire*, Fire Safety Journal 41, p. 539-546, 2006
- [50] B. Blocken, W. D. Janssen, T. van Hooff: *CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus*, Environmental Modeling & Software 30, p. 15-34, 2012
- [51] E. Ramponi, B. Blocken: *CFD simulation of cross-ventilation for generic isolated building: Impact of computational parameters*, Building and Environment 53, p. 34-48, 2012
- [52] A. Boukhanouf, A. Haddad: *A CFD analysis of an electronics cooling enclosure for application in telecommunication systems*, Applied Thermal Engineering 30, p. 2426-2434, 2010
- [53] Y. S. Tseng, C. H. Lin, Y. R. Yuann, J. R. Wang, P. Tsai: *Analyzing the alternative shutdown cooling behaviors for Chinshan Nuclear Power Plant using CFD simulation*, Annals of Nuclear Energy 38, p. 2557-2568, 2011
- [54] Kumaresan T., Joshi B. J.: *Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks*, Chemical Engineering Journal, 115, 173-193, 2005
- [55] Egedy A., Varga T., Chován T.: *CFD modeling and video based model validation for a stirred reactor*, Computer Aided Chemical Engineering, 1123-1127, 2012, ISBN: 978-0444-59519-0
- [56] Birge B.: *PSOt – a particle swarm optimalization toolbox for use with Matlab*, Swarm Intelligence Symposium, 182–186, 2003

- [57] Bonvillani, P., Ferrari, M. P., Ducrós, E. M., Orejas, J. A.: *Theoretical and experimental study of the effects of scale-up on mixing time for a stirred-tank bioreactor*, Brazilian Journal of Chemical Engineering, 23, 1-7, 2006