

Modelování laminárních statických mixerů

Statické laminární míchání viskózních kapalin má v průmyslu široké pole využití. Obzvláště v oblastech jakými jsou farmacie, biomedicína, petrochemický průmysl a spotřebitelské produkty. Tyto jevy jsou při použití tradičních CFD metod (Computational Fluids Dynamics) velmi náročné na modelování. Výrobce statických laminárních mixerů ke směšování lepidel, tmelů a další montážních kapalin, firma Nordson EFD spolupracovala s certifikovaným konzultantem programu COMSOL Multiphysics Veryst Engineering na optimalizaci a nalezení požadovaného směšovacího poměru statického laminárního mixéru.

Statické mixéry jsou levné, přesné a umožňují míchání široké škály kapalin v různých směšovacích poměrech. V mnoha případech je směšovaná kapalina velice viskózní a molekulární difuze ve směšované látce je malá, a proto musí být kapalina intenzivně mechanicky míchána. To je v ostrém kontrastu s turbulentním mícháním nebo mícháním plynů, jež vykazují výrazně vyšší difuzivitu. Simulovaný laminární mixer, který je zobrazen na obrázcích, je navržen tak aby obsahoval přepážky rozdělující a opět směšující kapalinu, invertované přepážky odvádějící kapalinu pryč od vnějších stěn a spirálové přepážky, které prodlužují oblast směšování a skládají proudění. V případě, že se na výstupu mixéru vyskytuje pouze koncentrace, která odpovídá koncentraci smíšených kapalin v celém průřezu, pak můžeme prohlásit, že bylo dosaženo požadované kvality promíchání. Na obrázku č. 1 je zobrazen statický mixer vyráběný firmou Nordson EFD, jenž je používán pro míchání lepidel v různých průmyslových oblastech.

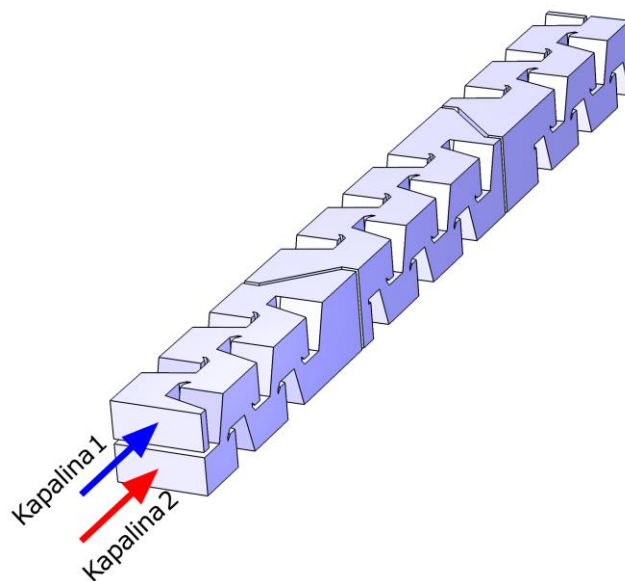


Jednoučelové statické mixéry od firmy Nordson EFD.

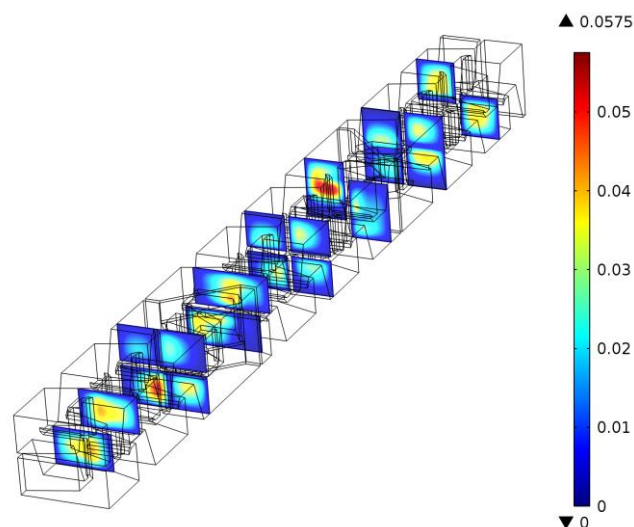
Pro porozumění ději a následnou optimalizaci statického laminárního mixéru je velice důležitý přesný CFD model. Bohužel nelze přímo použít jednoduchý model dvoufázového proudění vzhledem k tomu, že model nedokáže eliminovat numerickou difuzi a tím pádem vypočtený výsledek neodráží skutečný proces míchání. Numerická difuze je chyba výpočetní metody, která obvykle vzniká u upwind schématu prvního řádu (upwind schéma označuje třídu numerické diskretizace pro vyřešení hyperbolické parciální diferenciální rovnice a s jeho pomocí lze numericky simulovat směr šíření proudění). Numerickou difuzi lze zredukovat volbou jemnější sítě, menší stabilizací a jinými numerickými technikami. Nicméně, numerická difuze vždy převažuje nad velmi nízkou molekulární difuzí přítomnou ve statických laminárních mixérech.

CFD, trasování částic a kvalita promíchání

Veryst Engineering ve spolupráci s Nordson EFD vyvinuli nový modelovací nástroj pro simulaci laminárních statických mixérů. K určení celkového výkonu mixéru, popisu kompletního pole proudění a tlakové ztráty uvnitř statického laminárního mixéru použili numerický program COMSOL Multiphysics (obrázek č. 2). K zmapování pohybu částic míchaných kapalin bez uvažování numerické difuze využili jak výsledků proudnic, tak i trasovaných nehmotných částic. Na obrázku č. 3 jsou zobrazeny kontury rychlosti v různých průřezích mixéru. Obrázek č. 4 zobrazuje trasování částic, kdy se kapaliny nacházejí uprostřed statického laminárního mixéru. Dále jsou na obrázku zobrazeny Poincaré mapy, které zobrazují oblasti, kde částice procházejí přes konkrétní rovinu v mixéru. Další součástí návrhu a optimalizace statického laminárního mixéru byly studie konvergence sítě pro část simulace proudění nebo ověření optimálního nastavení časového kroku. V této fázi vývoje zjistili, že použité proudnice jsou příliš mohutné na to aby postihly tenké vlasové paprsky nesmíchaných látek. Dále zjistili, že použitím Particle Tracing Modulu lze výrazně snížit výpočetní náročnost spolu se snížením výpočetního času.

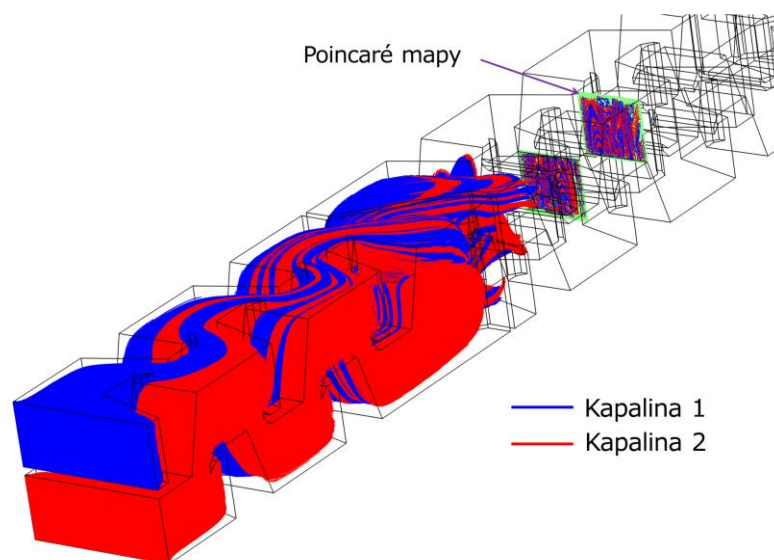


Geometrie statického mixéru se zobrazenými vstupními podmínkami.



Kontury rychlosti v různých průřezích statického laminárního mixéru.

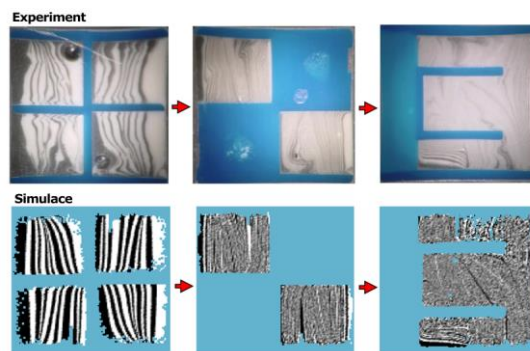
Dalším krokem byl export dat proudnic a trasovaných částic do nově vyvinutého vlastního algoritmu, jenž umožňuje výpočet dvou kritérií kvality promíchání. Prvním kritériem je variační koeficient (CoV – Coefficient of Variation), který se pohybuje v rozmezí od hodnoty nula pro perfektně promíchané látky až po hodnotu jedna pro nepromísené látky. Vyhodnocení kvality promíchání značně záleží na velikosti kontrované oblasti, tedy tento způsob může být do jisté míry nepřesný. Druhým přesnějším kritériem je vyhodnocení série průřezů mixérů, které jsou podobné Poincaré mapám (viz. Obrázek č. 4). Tyto obrázky napomohly určit pozici tenkých paprsků jednotlivých materiálů, které nebyly patrné z celkové variační analýzy CoV. Z jednotlivých průřezů mixéru lze vytvořit animaci, která usnadňuje vizualizaci procesu míchání.



Trasované částice a Poincaré mapy v oblastech, kde se kapaliny začínají dobře promíchávat.

Věrohodnost výsledků simulace

Pro ověření použitých modelovacích nástrojů, porovnali vývojáři výsledky simulace s experimentálními daty naměřenými firmou Nordson EFD. Pro experiment použili epoxid, jeden bílé barvy a druhý černé. Tyto materiály po smíchání ztuhnou. Pro posouzení kvality směšování byl statický laminární mixér po ztuhnutí materiálů rozřezán na zhruba čtyřicet stejně velkých částí. Následně firma Veryst Engineering porovнала vzorky se simulací, kde jsou vyobrazeny proudnice a trasované částice. Na obrázku č. 5 jsou barevně rozlišeny čtyři informace o kvalitě promíchání: 1. černá barva znázorňuje první materiál, 2. bílá barva označuje druhý materiál, 3. šedá barva označuje velmi dobře promíchanou kapalinu a 4. žádná data. Oblasti bez dat jsou zóny bez proudění nebo oblasti, kde dochází k recirkulaci. Aby vývojáři eliminovali oblasti bez dat, dodatečně generovali částice v různých oblastech modelu mixéru, tedy nejen na vstupu. Na obrázku č. 5 můžete vidět porovnání mezi experimentálními daty a simulací. Na obrázku naleznete tři různé řezy z první poloviny mixéru. Modře je znázorněna stěna přepážek v experimentu. Černý a bílý epoxid vstupuje při experimentu do mixéru pod mírně odlišným úhlem než v simulaci, což je způsobeno nedokonalým oddělením obou epoxidů na vstupu mixéru. To má vliv na rozložení černého/bílého epoxidu v různých řezech podél mixéru. Nicméně je známo, že úhel, pod kterým vstupuje kapalina do systému nemá významný vliv na kvalitu promíchání. Výsledkem je výborná shoda mezi experimentem a simulací ve smyslu identifikování nepromíchaných oblastí a tenkých paprsků kapaliny.



Porovnání experimentálních dat s numericky vypočtenými výsledky.

Optimalizace návrhu mixéru

Výsledky z CFD simulace, trasování částic a zpracování dat vlastním algoritmem umožnily vývojářům detailně porozumět rozložení rychlostního pole uvnitř mixéru. Takové výsledky by nebylo možné získat prostým fyzikálním experimentem. Simulace pomohla firmě Nordson EFD optimalizovat část jejich mixérů. Veryst Engineering a Nordson EFD i nadále spolupracují na dalších vylepšeních a rozšiřují aplikace na ostatní tvary mixérů - například pro míchání výrazně jiných kapalin jak Newtonovských tak i ne-Newtonovských.

Pavel Ludvík
HUMUSOFT s.r.o.
Pobřežní 20
186 00 PRAHA 8
Česká republika
tel.: 284 011 730
fax: 284 011 740
www.humusoft.cz
ludvik@humusoft.cz