

# CFD pro tepelnou techniku I

## přednáška

### Vícefázové proudění

Pavel Zácha

zdroj: [Kozubková, 2008], [Bojko, 2010], [Fluent, 2011]

#### Přístupy k vícefázovému proudění

V AF existují dva přístupy:

##### Euler-Lagrange

- **tekutá fáze** - je uvažována jako kontinuum a je řešena Navier-Stokesovými rovnicemi
  - **dispergovaná fáze** (částice)
    - je řešena stopováním velkého počtu částic / bublin / kapek v proudovém poli
    - může vyměňovat moment, hmotu a energii se spojitou fází. Základním předpokladem je, že v tomto modelu dispergovaná fáze zaujímá malý objemový zlomek, (pro hm. tok to nemusí platit)
    - trajektorie (dráhy) částic nebo kapek jsou počítány individuálně v předdefinovaných intervalech během výpočtu spojitě fáze
- ⇒ modelování proudění částic ve sprejích, sušičkách, spalování uhelných a kapalných paliv a částicemi ovlivněné proudění
- ⇒ nevhodný pro modelování směsi kapalina-kapalina, fluidizačního lože a dalších aplikací, kde objemový zlomek druhé fáze není zanedbatelný

##### Euler-Euler

- **různé fáze** řešeny matematicky jako vzájemně se prostupující kontinua
- objem jedné fáze není překryt objemem druhé fáze => zaveden objemový podíl fáze
- objemové podíly (zlomky) se předpokládají jako funkce spojitě v čase a prostoru a jejich součet je roven **1**
- rovnice jsou definovány pro každou fází

## Vícefázové matematické modely

Umožňují modelování většího počtu oddělených, ale vzájemně se ovlivňujících fází. Fáze mohou být kapalné, plynné a pevné v různých kombinacích:

- plyn-tekutina
- tekutina-tekutina
- plyn-pevné částice
- kapalina-pevné částice
- trojfázové proudění

Modely:

a) přístup Euler-Euler:

- VOF – Volume of Fluid
- Mixture Model
- Eulerian Model
- Wet Steam Model

b) přístup Euler-Lagrange:

- Discrete Phase Model



slug flow



bubbly, droplet, or particle-laden flow



stratified/free-surface flow



pneumatic transport, hydrotransport, or slurry flow



sedimentation



fluidized bed

Vícefázové režimy proudění [Fluent, 2011]

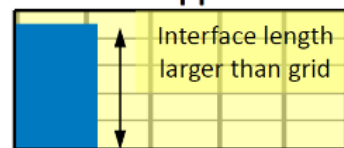
## Vícefázové matematické modely

VOF – Volume of Fluid

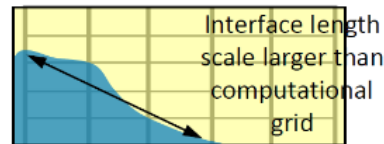
- pro 2 nebo více nemísitelných kapalin s rozhraním
- 1 sada hybnostních rovnic + sleduje se objemový podíl pro každou kapalinu v každé výpočetní buňce
- nemohou být modelovány 2 plyny (mísení na molekulové úrovni)
- nevhodný pro případy s délkou rozhraní menší v porovnání s výpočetní doménou (snižování numerické přesnosti).

⇒ použití pro stratifikované (vrstvené) proudění a pro proudění s volnou hladinou (např. rozvrstvené toky jako proudění v kanále, dmýchání plynu na hladinu kapaliny), pohyb velkých bublin v kapalině, atd.

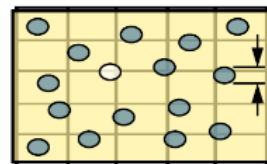
### VOF Applicable



Interface length larger than grid



Interface length scale larger than computational grid



Interface length scale is smaller than grid

Aplikovatelnost VOF modelu na velikost buněk sítě

# Vícefázové matematické modely

## Mixture Model

- zjednodušený model pro  $n$  fází (předpoklad kinetické rovnováhy – nulové relativní zrychlení jednotlivých fází)
- rovnice hybnosti, kontinuity, energie, pro směs, objemového podílu sekundárních fází; stanovení relativních rychlostí
- obsahuje podmodely vypařování a kondenzace (Evaporation-Condensation model)
- často lze použít jako zjednodušenou alternativu k Eulerovskému modelu (menší nároky na výpočet a paměť, robustnost)

⇒ pro:

- ⇒ případy s homogenním vícefázovým prouděním
- ⇒ fáze pohybující se stejnou rychlostí
- ⇒ výpočty s neneutonskými kapalinami
- ⇒ jednotlivé fáze (plyny, kapaliny) s odlišnými hustotami (např. modelování vzniku a vývoje kavitace).

# Vícefázové matematické modely

## Eulerian Model

- nejkomplexnější multifázový model v AF
- Umožňuje simulovat více samostatných a také interagujících látek (kapaliny, plyny, pevné částice)
- zvyšuje nároky na paměť a délku výpočtu vč. možných komplikací s konvergencí
- co je řešeno:
  - rovnice hybnosti, entalpie a kontinuity pro každou fázi a sleduje se její objemový podíl
  - fáze jsou mezi sebou propojeny rovnicemi zahrnujícími mezifázové interakční síly
  - pro každou fázi je zvlášť řešen turbulentní model
  - lze modelovat také homogenní nebo heterogenní chemické reakce

# Vícefázové matematické modely

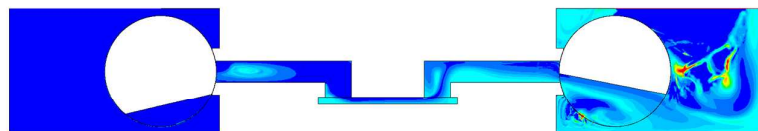
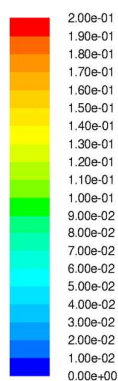
## Wet Steam Model (model mokré páry)

- pro případy rychlé expanze páry, kdy při poklesu teploty pod bod varu může krátkodobě pára kondenzovat. Proces expanze způsobuje nejprve podchlazení přehřáté páry a následně tvorbu kapiček a tedy přechod do stavu mokré páry.
  - Míšení páry a vody je modelováno Navier-Stokesovými rovnicemi stlačitelného proudění doplněných dvěma transportními rovnicemi pro stanovení **hmotnostního podílu vodní fáze ( $\beta$ )** a **počtu vodních kapiček v jednotce objemu ( $n$ )**.
  - mnoho omezení (skluz  $\sim 1$ ; zanedbatelná interakce mezi kapičkami, velmi malá velikost kapiček,  $\beta < 0,2$ , ...)
- ⇒ využití při analýzách a konstrukci nízkotlakých dílů parních turbín; tvorba mokré páry v parních strojích

# Vícefázové matematické modely

## Wet Steam Model (model mokré páry)

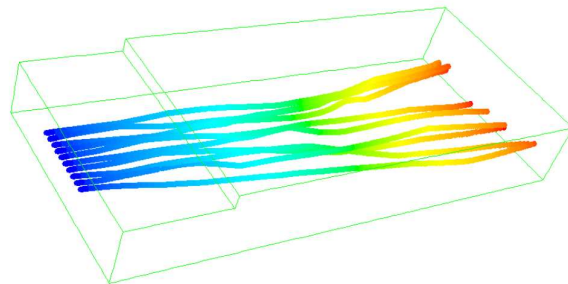
- pro případy rychlé expanze páry, kdy při poklesu teploty pod bod varu může krátkodobě pára kondenzovat. Proces expanze způsobuje nejprve podchlazení přehřáté páry a následně tvorbu kapiček a tedy přechod do stavu mokré páry.
  - Míšení páry a vody je modelováno Navier-Stokesovými rovnicemi stlačitelného proudění doplněných dvěma transportními rovnicemi pro stanovení **hmotnostního podílu vodní fáze ( $\beta$ )** a **počtu vodních kapiček v jednotce objemu ( $n$ )**.
  - mnoho omezení (skluz  $\sim 1$ ; zanedbatelná interakce mezi kapičkami, velmi malá velikost kapiček,  $\beta < 0,2$ , ...)
- ⇒ využití při analýzách a konstrukci nízkotlakých dílů parních turbín; tvorba mokré páry v parních strojích



# Vícefázové matematické modely

## Discrete Phase Model

- založen na Lagrangeově přístupu
- typickými aplikacemi je unášení pevných částic (kapek, bublinek), vznik kapek, ohřev/ochlazování částic, hoření částic (spalování práškového uhlí)
- částice nejsou modelovány jednotlivě, ale jsou definovány vzorky dostatečně charakterizující proudění
- celkový průtok části modelován sledováním malého počtu částic pohybujících se ve spojité fázi (vypouští se z bodu „injection“)
- pohyb částic je ovlivněn hydrodynamickým odporem a gravitací
- pohyb a přestup tepla a hmoty je definován soustavou obyčejných dif. rovnic dle času



*Trajektorie prachových částic v plynu*

## Literatura

- [Kozubková, 2008] Kozubková, M.: Modelování proudění tekutin. VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2008
- [Bojko, 2010] Bojko, M.: 3D Proudění – ANSYS Fluent. Učební text. VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2010
- [Fluent, 2011] ANSYS FLUENT Theory Guide, Release 14.0. ANSYS, Inc., November 2011