

## Töbzfázisú áramlás modellezése

Dr. Kristóf Gergely  
2013. november 18.

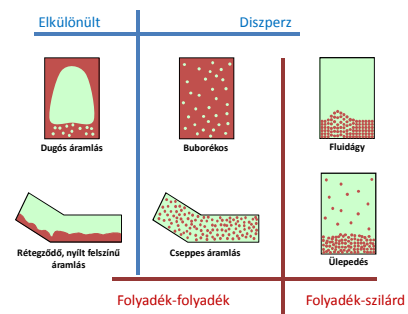
## Meghatározások

- A fázis az áramló közeg egy része, amely határozott felület mentén elkülönül és sajátos dinamikai tulajdonságokkal rendelkezik. Egy fázis lehet szilárd, cseppfolyós vagy légnemű, azonban több fázis is lehet azonos halmazállapotban, pl. különböző méretű szemcsék esetében.
- A töbzfázisú áramlásban egyszerre jelen lehetnek:
  - Eltérő halmazállapotú fázisok;
  - Azonos halmazállapotú, de eltérő fizikai vagy kémiai tulajdonságokkal rendelkező fázisok (pl. olaj-víz).
- Ezzel szemben, a többkomponensű (multispecies) áramlások esetében: a komponensek molekuláris szinten keverednek egymással és leírásukra azonos sebességet, hőmérsékletet alkalmazunk.

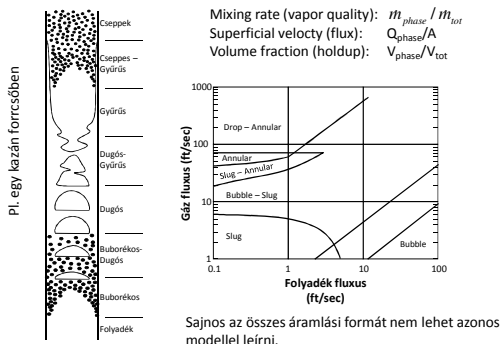
## Töbzfázisú áramlások típusai

- Gáz-folyadék áramlás
    - Buborékos áramlás
    - Cseppes áramlás
  - Gázáramlás szilárd szemcsékkel
    - Pneumatikus szállítás
    - Fluid ágyak
  - Zagyok
    - Szén és érc szállítás
    - Izszap áramlás
  - Elkülönülő fázisok áramlása (nyílt felszínű áramlások)
- Minden típusnak sajátos különféle áramlási formái lehetnek

## Áramlási formák



## Áramlási formák függőleges gáz-folyadék áramlásban



## Töbzfázisú modellek FLUENT-ben

- Volume of Fluid model (VOF)**
  - Elkülönült áramlási formák elemzésére alkalmas, amikor a felszín pontos alakja a kérdés.
- Mixture Model**
  - Lokálisan homogén áramlást feltételez amelyet a fázisarányokkal, mint mezőváltozókkal írunk le.
  - A keverék összegzett mozgásegyenletét oldjuk meg átlagolt anyagjellemzők figyelembevételével továbbá a fázisok közötti viszonylag kis elcsúszási sebességre vonatkozó mozgásegyenletet.
- Eulerian Model**
  - Az Eulerian (és Granular) modellekben alkalmazott megközelítés szerint minden fázis elkülönült, de egymással elkeveredett formában van jelen.
  - Minden fázis mozgását különálló mozgásegyenlettel írja le, a fázisok közötti kölcsönhatás a mozgásegyenletekben megjelenő fázis-csatoló tagokkal vehető figyelembe.
- Lagrangian Discrete Phase Model (DPM)**
  - DPM modell esetében a szemcsékhez pillanatnyi helyzetet és sebességet határoznak meg.
  - Ha minden szemcse egyedi követése nem lehetséges, „szemcsecsomagokat” képezhetünk, melyben a közvetett szemcse nagyszámú hasonló tulajdonságú szemcsét reprezentál.
  - A DPM a folytonos fázissal 1, 2, 3 vagy 4 irányú kapcsolatban állhat, sűrű áramlásban a szemcsék közötti ütközések figyelembe vehetők.

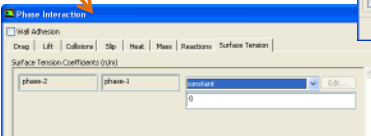
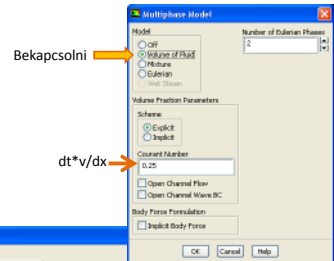
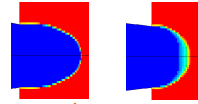
## A VOF modell alkalmazhatósága

- A VOF modell egymással nem keveredő folyadékok modellezésére alkalmas:
  - Két gázkomponens nem modellezhető, mert molekuláris szinten elkeverednek;
  - Folyadék-folyadék áramlás modellezhető, ha a két folyadék nem keveredik (víz-olaj keverék).
- A felületi feszültség és a fali adhézió figyelembe vehető.
- Tipikus problémák:
  - Cseppképződés folyadéksugárból (pl. üzemanyag befecskendezés);
  - Nagy buborékok mozgása folyadékban;
  - Szeperator tartályok;
  - Járművek üzemanyag tartályának lötyögése;
  - Gátszakadás;
  - Hajó körüli áramlás (hullámmellenállás);
  - Talajvíz (beszivárgás kutakba).
- A VOF modell nem alkalmazható, ha a határfelbín hossza sokkal kisebb a tartomány méreténél.

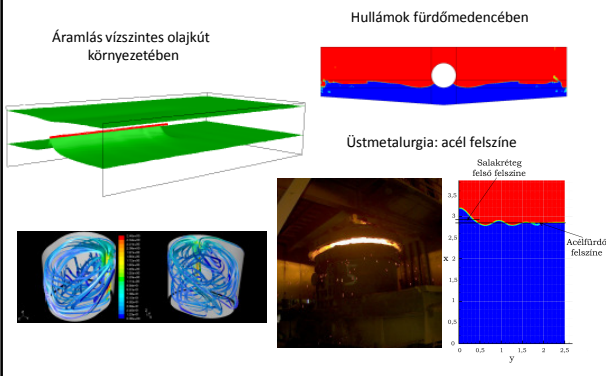
## A VOF modell paramétere

Az explicit séma éles felbín ad, azonban a Courant szám < 1 (kb. 0.25):

Implicit séma stacionárius módban is tud futni:



## Alkalmazási példák



## Mixture modell

- A mixture modell a többfolyadék (Eulerian) modell egyszerűsített változata. Sok esetben robusztusabb, kisebb a számítási költség és memóriaigény.
- A keverék kontinuitását, mozgásegyenletét és energia egyenletét, továbbá a másodlagos fázisok térfogatkoncentráció egyenletét oldja meg.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq})$$

- A másodlagos fázisok relatív sebességét algebrai összefüggés alapján számolja. Feltételezi, hogy a relatív sebesség „azonnal” beáll (pl. jóval kisebb mint a keverék sebessége).
- Egységes turbulencia jellemzőket feltételez.
- Kavitációs modell és granulátum-ágy modell alkalmazható.

## A relatív sebesség számítása

$$\bar{\mathbf{v}}_{pq} = \frac{\tau_p \rho_p - \rho_m \bar{\mathbf{a}}}{f_{drag} \rho_p} + \text{egy tag turbulens áramlás esetén}$$

(Helyette saját képlet is megadható UDF-ben.)

$\bar{\mathbf{a}}$  : a másodlagos fázisra ható térerő (az elsődleges fázis koordinátarendszerében)

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_q}$$

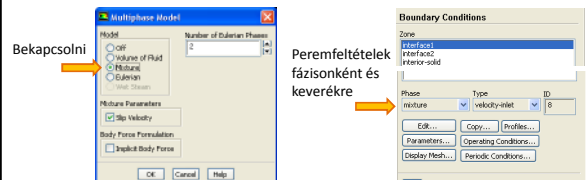
: a szemcsék relaxációs ideje

$f_{drag}$  : a szemcsék ellenállás tényezője. Több modell választható, az alapértelmezett modell a Shiller-Naumann modell:

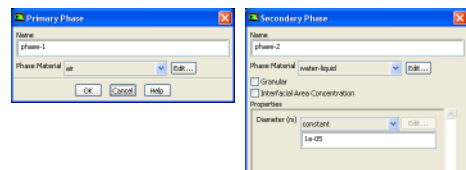
$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re^{0.687} & Re > 1000 \end{cases}$$

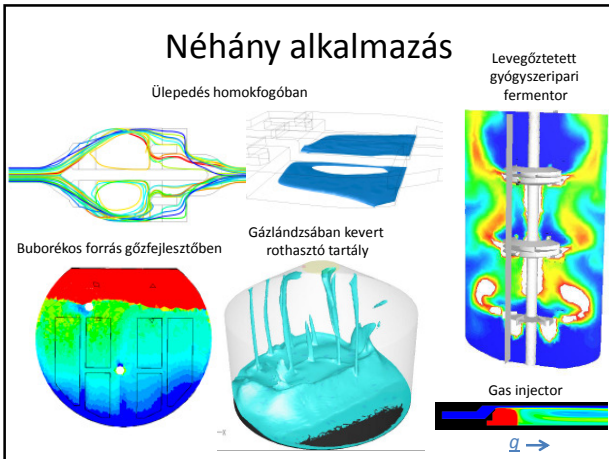
Drift sebesség:  $\bar{\mathbf{v}}_{dr,p} = \mathbf{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \bar{\mathbf{v}}_{qk}$

## A Mixture modell paramétere



A Phases menüben:





### Többfolyadék modell (Eulerian)

- Egy folytonos elsődleges fázisban elkeveredő diszperz fázis (pl. szemcsék, buborékok, cseppek) modellezésére alkalmas.
- Lehetővé teszi a fázisok elkeveredését és szeparálódását is.
- Minden fázisra külön-külön megoldja a mozgásegyenletet, kontinuitást és energiaegyenletet, emellett követi a fázisarány változását. Minden megmaradási tételben összekapcsolhatók egymással a fázisok (inter-phase interaction terms).
- Egységes nyomást feltételez, emellett a Granulár modell esetében a szilárd szemcsék közötti erők figyelembe vehetők.
- Figyelembe vehető a fázisok közötti ellenállás, látszólagos tömeg (buborékok esetén), és a szemcsékre ható felhajtóerő (erősen nyíróerő áramlásban).
- Minden fázisra külön számolhatók a turbulens jellemzők.
- Homogén reakciók és heterogén reakciók (pl. szemcsék égése) modellezésére használható.

### Granuláris modellek

Elastikus állapot	Plasztikus állapot	Viszkózus állapot
Stagnáló üledék	Lassú áramlás	Gyors áramlás
A feszültség a deformációtól függ	A feszültség a deformációtól független	Feszültség a deformációsebességtől függ

Ezeket a mozgásformákat lehet **Mixture** vagy **Eulerian** **modellel** leírni a szemcsék közötti ütközési és súrlódási erők figyelembevételével.

### Θ granuláris hőmérséklet

- A szemcsék a véletlenszerű mozgásukban energiát tárolnak, amelyet Θ granuláris hőmérséklettel fejezhetünk ki.
- A szilárd fázis nyomása és viszkozitása és diffúziója a Θ-tól függ.
- Θ-t növeli a szilárd fázis deformációja, csökkenti a rugalmatlan ütközések és a súrlódás a folytonos fázissal.
- Transzportegyenletről, (vagy sűrű granulátum ágyak esetén) algebrai összefüggésből számolják ki a granuláris modellek.

### Nedves gőz modell

- A térfogati kondenzáció kezdeti stádiumát írja le Eulerian modellben.
- Fő alkalmazási területe: gőzturbinák és (egyéb erőművi alkatrészek) csepperóziójának elemzése.
- Feltételezi, hogy a víz fázis tömegaránya viszonylag kicsi (<0.2), a cseppek az áramlással együtt mozognak, és nincsen közöttük közvetlen kölcsönhatás.
- Transzportegyenletekkel határozza meg a gőz tömegkoncentrációját és a cseppek darabszám-koncentrációját.
- Beépített reális gáz modell és széles tartományban érvényes függvények a víz anyagjellemzőire.
- Csak sűrűség alapú megoldóval működik.

### Kavitációs modell

Nyomásváltozás okozta gőzképződés és kondenzáció kis gőztartalom mellett. Víz turbinák és szivattyúk kavitációs jellemzőinek meghatározására.

A gőzfázis kontinuitási egyenlete: Gőzfázis képződési rátája (kg/m<sup>3</sup>-s).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{v}_v) = \pm \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{3}{4\pi n} \right)^{\frac{1}{3}}} \sqrt{\frac{2 \pm (p_v - p)}{3 \rho_l}}$$

Buboréknövekedés sebessége

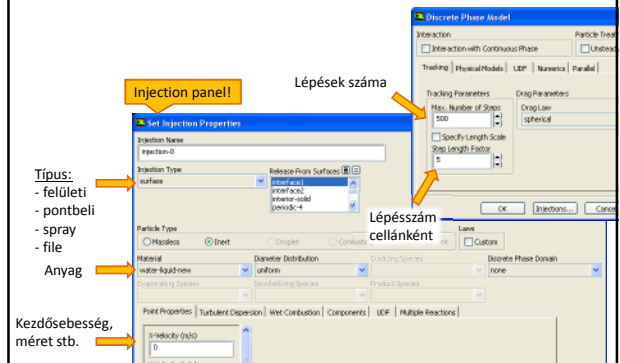
α: a gőz térfogatkoncentrációja;  
 ρ<sub>v</sub>: gőz sűrűsége;  
 v<sub>v</sub>: gőzfázis sebessége;  
 ρ: víz sűrűsége;  
 n: buborékok térfogatkoncentrációja;  
 p<sub>v</sub>: telített gőznyomás (hőfok függvénye);  
 p: keverék nyomása;  
 ρ: keverék sűrűsége.

FLUENT rendszerben a kavitáció modell **Mixture** modellel és **Eulerian** modellel használható, három különböző modellváltozat áll rendelkezésre.

### Diszkrét fázis modell (DPM)

- Egyes részecskék, vagy részecskecsomagok mozgásának trajektóriát határozza meg a folytonos fázisban.
- Alkalmazható a folytonos közegben diszpergált szemcsék cseppek modellezésére.
- Néhány jellemző ipari alkalmazása: üzemanyag befecskendezés, szárítás, ciklonok, szénpor tüzelés, hígáramú pneumatikus szállítás.
- A diszperz és folytonos fázis közötti tömeg, impulzus és hőátadás figyelembe vehető.
- Instacionárius módban a DPM csomagok pillanatnyi pozícióját frissíti időlépésenként, stacioner módban egész DPM pályákat számol, melyek mentén átadja az erőket a folytonos fázisnak egy-egy iterációs lépésben.
- A Dens DPM modell és a DEM modell kivételével:
  - Nem veszi figyelembe a szemcsék közötti kölcsönhatásokat;
  - A diszperz fázis alacsony (<10%) térfogat-koncentrációban van jelen, azonban a tömegkoncentráció nagy is lehet;
  - Feltételezi, hogy a részecskék áthaladnak a tartományon (nem hosszan tartózkodnak, mint pl. szuszpenzió vagy ülepedés esetében).

### A diszkrét fázis modell paramétereit



### A szemcsé mozgás alapegyenlete

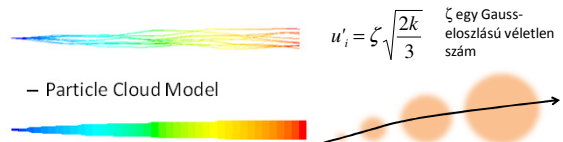
$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = F_D (\vec{v} - \vec{v}_p) + \underbrace{\vec{g}}_{\text{Ellenállás}} \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} + \vec{F}_{\text{other}} \quad \underbrace{\phantom{\vec{g}}}_{\text{Gravitációs erő}}$$

További erők:

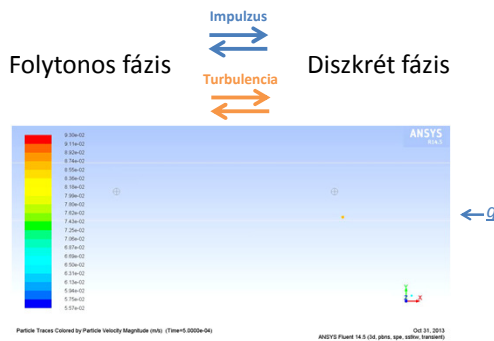
- Tehetetlenségi erő forgó koordináta-rendszerben;
- Termoforézis (Termophoretic force) a hőmérséklet gradienssel ellentétes irányban;
- Brown erő: gázmolekulák okozta véletlen lökdösés, sub-micron méretű szemcsékre vehető figyelembe, lamináris áramlásban (ha az energia egyenlet aktív).
- Turbulens lökdösés;
- A nyíró áramlás okozta felhajtóerő (Saffman's lift force);
- Felhasználó által definiált további erők.

### A turbulencia hatása

- A részecskék „próbálják” követni a turbulens sebesség-ingadozást.
- Ez a hatás a diszkrét fázis szóródásához vezet.
- Két megközelítés alkalmazható:
  - Random Walk Model



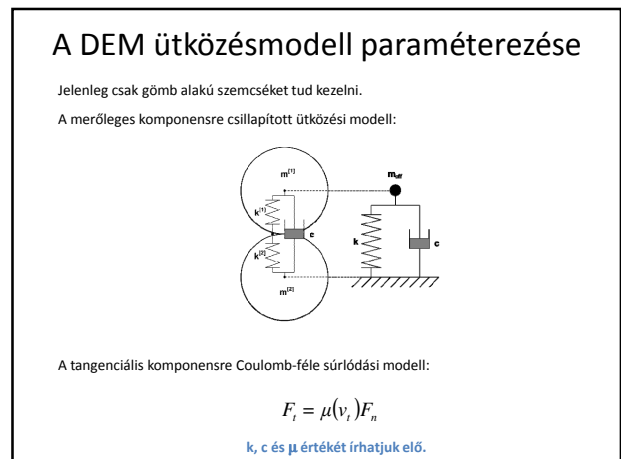
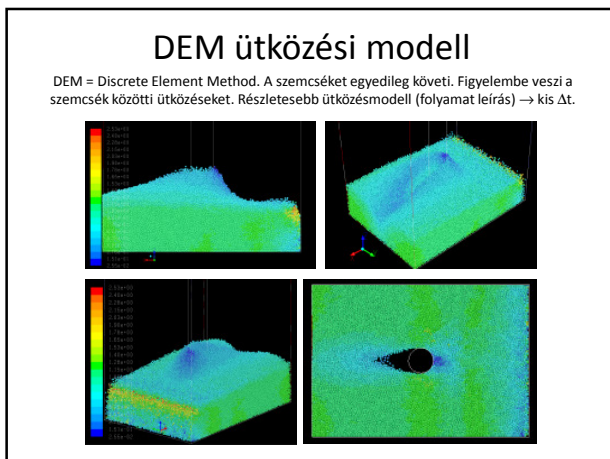
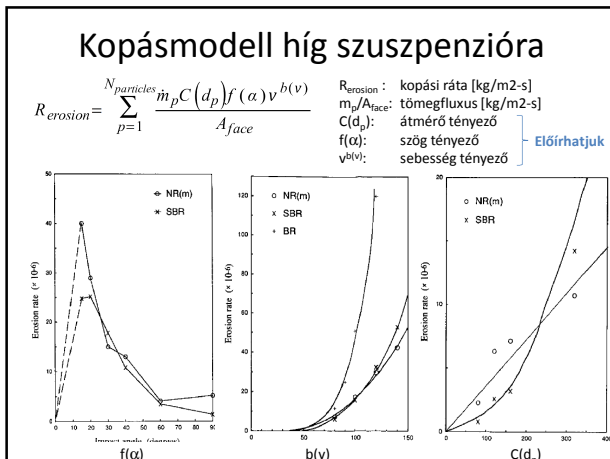
### A diszkrét és folytonos fázisok mozgásának négy irányú csatolása



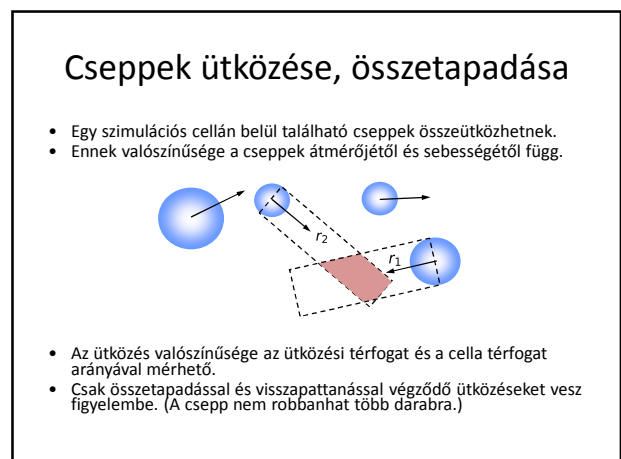
### A DPM modell fali peremfeltételei

- Escape – A részecske elhagyja a számítási tartományt.
- Trap – Letapad a falon.
- Reflect – Visszapattan a falról részben rugalmasan.
- Wall Jet – A szemcsék a fal mentén csúsznak. (Nincs jelentős filmképződés).
- Wall Film – Leírja a jelentős vastagságú fali film mozgását is (pl. benzín befecskendezés vagy esővíz egy jármű felületén).

Fali visszapattanási tényezők előírhatók:  $\eta_n = \frac{v_{2,n}}{v_{1,n}}$   $\eta_t = \frac{v_{2,t}}{v_{1,t}}$



- ### Spray modellezés
- Elsődleges break-up:** a fúvókából kilépő sugár nagyobb cseppekre bomlik. Ezt befolyásolja a fúvóka méretei, kilépő sebesség és turbulencia profija is. A fúvóka fizikai paraméterein alapján a cseppméretet, a befecskendezési szögét és a befecskendezés időpontját véletlenszerűen változtatja. Az **Injections menüben** 5 különböző spray modell választható (Atomizer models).
  - Másodlagos break-up:** A nagyobb cseppek a relatív légáramlás miatt kisebb cseppekre bomlanak. Utód folyadékcsomagok (Child parcels) indulnak el a nagy csepp környezetéből. A **Discrete Phase menüben** választhatók ki.
    - Taylor Analogy Break-up (TAB) model:** rugó-tömeg-csillapító (felületi feszültség-tömeg-viszkozitás). Viszonylag kis Weber-szám (We<100) esetén alkalmazható.
    - Wave model:** a nagy cseppek felületén a léghellenállás hatására hullámok alakulnak ki, amelyek felerősödnek és ez vezet a csepp széteséséhez. A keletkezett cseppek mérete a leggyorsabban erősödő hullámhossz alapján határozható meg.



## A Dens DPM modell

- A részecskék ütközését és sűrűdését leíró erők számításához a szükséges a szemcsés fázis térfogataránya.
- A modell az Eulerian modellre épül, azonban diszperz fázisokra vonatkozó kontinuitást és mozgásegyenletet nem oldja meg (Eulerian rendszerben), hanem ezek mezőváltozóit a Lagrangian modellből veszi át.
- A szemcsék kölcsönhatásának számításához szükséges granuláris hőmérsékletet a folytonos fázisba interpolált sebesség alapján számolja.
- Nem kell a részecske méret osztályokhoz különféle folytonos fázisokat definiálni, ez a Lagrangian modellel természetes módon megtörténik.

## Anyag és energiaátadás DPM modellben (Law 1-10)

Beépített összefüggésekkel vagy UDF-el

- Szemcse fűtése és hűtése (heating and cooling)
- Csepp párolgása (evaporation)
- Csepp forrása (droplet boiling)
- Kigázosodás (devolatilization)
- Felületi égés (surface combustion)
- Többkomponensű szemcsék (multicomponent particle definition)