



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**CFD MODELOVÁNÍ TOKU PARTIKULÁRNÍCH LÁTEK
V ROTAČNÍ PECI**

CFD MODELLING OF GRANULAR FLOW IN ROTARY KILN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Slowik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Juřena, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství

Student: **Roman Slowik**

Studijní program: Strojírenství

Studijní obor: Procesní inženýrství

Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Juřena, Ph.D.**

Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

CFD modelování toku partikulárních látek v rotační peci

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba, zpracování, transport i skladování a znovuvyužití partikulárních látek je typickou oblastí procesního průmyslu. Aplikace zahrnují výrobu léčiv, stavebních materiálů, chemikálií, potravinářství, energetiku. Při návrhu a optimalizaci zařízení pracujících s partikulárními látkami se využívají i pokročilé simulační systémy pro modelování toků látek a jejich interakce s okolím. Práce bude mít charakter tvorby, nastavení, testování a vyhodnocování CFD modelu reálného zařízení pro zpracování partikulárních látek.

Cíle diplomové práce:

Rešerše CFD metod modelování toků partikulárních látek v rotačních pecích.
Tvorba a popis geometrie a výpočtové sítě rotační pece včetně modelových zjednodušení.
Popis provozních podmínek rotační pece.
Popis zvolené výpočtové metody a nastavení CFD modelu a řešiče.
Vyhodnocení pohybu partikulárních látek v peci z hlediska mísení a zdržné doby na základě CFD výpočtu.

Seznam doporučené literatury:

WITT, P. J., M. D. SINNOTT, P. W. CLEARY a M. P. SCHWARZ. A hierarchical simulation methodology for rotary kilns including granular flow and heat transfer. Minerals Engineering [online]. 2018, 119, 244-262 [cit. 2019-10-17]. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.01.035. ISSN 08926875. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687518300463>

ESCOTET-ESPINOZA, M. S., C. J. FOSTER a M. IERAPETRITOU. Discrete Element Modeling (DEM) for mixing of cohesive solids in rotating cylinders. Powder Technology [online]. 2018, 335, 124136 [cit. 2019-10-17]. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.05.024. ISSN 00325910. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591018303942>

MAIONE, R., S. KIESGEN DE RICHTER, G. MAUVIEL a G. WILD. DEM investigation of granular flow and binary mixture segregation in a rotating tumbler: Influence of particle shape and internal baffles. Powder Technology [online]. 2015, 286, 732-739 [cit. 2019-10-17]. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.09.011. ISSN 00325910. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591015300590>

YIN, H., M. ZHANG a H. LIU. Numerical simulation of three-dimensional unsteady granular flows in rotary kiln. Powder Technology [online]. 2014, 253, 138-145 [cit. 2019-10-17]. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.10.044. ISSN 00325910. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591013006578>

KOMOSSA, H., S. WIRTZ, V. SCHERER, F. HERZ a E. SPECHT. Transversal bed motion in rotating drums using spherical particles: Comparison of experiments with DEM simulations. Powder Technology [online]. 2014, 264, 96-104 [cit. 2019-10-17]. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.05.021. ISSN 00325910. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591014004665>

MUJUMDAR, A. S. Handbook of industrial drying. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2007. ISBN 9781420017618.

ANSYS Academic Research CFD, Release 2019 R3, ANSYS Fluent Theory guide, ANSYS, Inc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

.....
prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

.....
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá modelováním toku partikulárních látek v rotačních pecích. K tomuto účelu bylo použito kombinovaného výpočtu CFD a metody diskretních prvků (DEM). S použitím dostupného výpočtového softwaru (Ansys Fluent) bylo provedeno několik simulací s cílem stanovení střední zdržné doby a pohybu materiálu v rotační bubnové sušárně a porovnání získaných výsledků s hodnotami určenými na základě empirických vztahů. Byl vytvořen regresní model pro odhad střední zdržné doby pro dané provozní podmínky. Rovněž byla provedena zjednodušená citlivostní analýza, v níž byla sledována změna výsledků udávaných modelem na základě modifikace vybraných vstupních parametrů modelu (konstanta tuhosti, průtok vzduchu, velikost částic).

Klíčové slova

Rotační sušárna, rotační pec, CFD, DEM, zdržná doba

ABSTRACT

This work deals with modeling the flow of particulate matter in rotary kilns. For this purpose, a combined CFD and Discrete Element Method (DEM) model was used. Using Ansys Fluent software, several simulations were performed in order to determine the mean residence time and movement of the material in the rotary drum dryer. Results of the computational model were used to develop a regression model of the mean residence time and compared to the values as given by empirical equations. Furthermore, a simplified sensitivity analysis was performed for the selected input parameters of the model such as the stiffness constant, air mass flow rate and the particle size.

Key words

Rotary dryer, rotary kiln, CFD, DEM, residence time

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLOWIK, Roman. *CFD modelování toku partikulárních látek v rotační peci* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124336>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Tomáš Juřena.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáše Juřeny, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....
Roman Slowik

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu Ing. Tomáši Juřenovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, vstřícnost při konzultacích a cenné rady. Rovněž děkuji Ing. Jířímu Bojanovskému za poskytnutý čas a praktické představení bubnové sušárny.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Rotační sušící pec	11
2.1	Základní rozdělení rotačních sušáren	12
2.2	Pohyb materiálu	13
2.3	Zdržná doba	15
3	Metody používané k simulování toku partikulární látky	16
3.1	Stručný obecný popis přístupů Euler/Lagrange.....	16
3.2	Simulace jiných autorů zaměřené na rotační válce	17
4	Popis řešené rotační pece	24
4.1	Geometrie	24
4.2	Výpočtová síť	25
4.3	Provozní podmínky.....	27
5	Volba a nastavení fyzikálního modelu.....	27
5.1	Rovnice plynné fáze	27
5.2	Rovnice pevné fáze.....	28
5.3	Koeficient rotačního odporu	28
5.4	Koeficient odporu a mezifázového přenosu hybnosti	29
5.5	Kolizní síly	29
5.6	Volba hodnot parametrů DEM modelu kolizí	31
5.7	Postup výpočtu	32
5.8	Okrajové podmínky	32
6	Vyhodnocení	35
6.1	Příčný pohyb materiálu.....	36
6.2	Zdržná doba	38
6.2.1	Metoda 1.....	40
6.2.2	Metoda 2.....	42
6.2.3	Porovnání s hypotézami zdržné doby.....	45
6.3	Vliv konstanty tuhosti.....	45
6.4	Vliv velikosti částic	49
6.5	Změna rychlosti proudění vzduchu	51
6.6	Lopatková vestavba	53
7	Závěr	56

8	Seznam použité literatury.....	57
9	Seznam použitých symbolů	61

1 Úvod

Rotační pece jsou obecně řečeno rotačně se pohybující zařízení určené pro tepelné zpracování materiálů. Zahrnují širokou škálu aplikací v chemickém a procesním průmyslu. Mezi typické procesy probíhající v rotačních pecích patří sušení, předehřev a redukce, spalování, kalcinace a sintrování. Rotační pece se dělí na spalovací (sintrovací) pece a sušící pece. Oba tyto typy jsou konstrukčně velice podobné, avšak primárně se liší svým vlivem na zpracovávaný materiál.

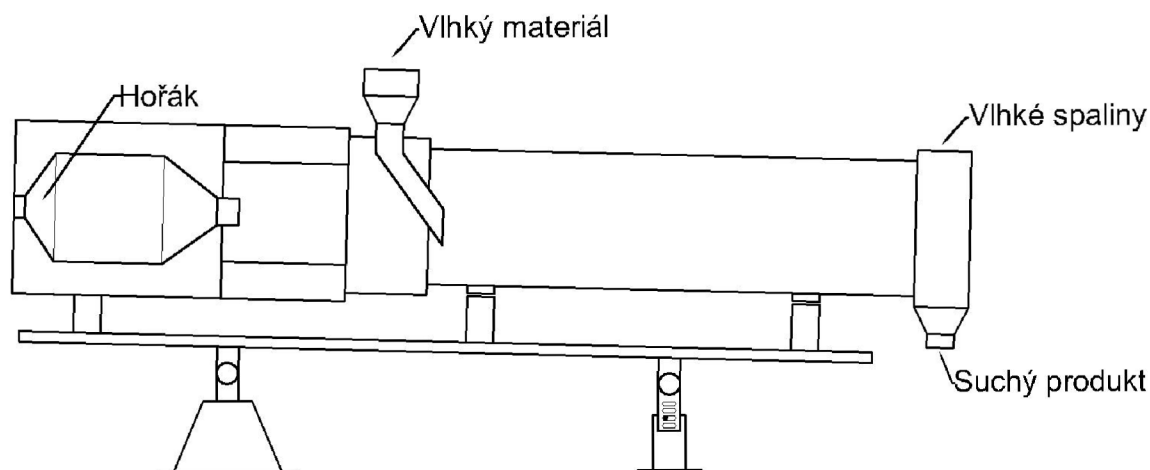
V spalovacích pecích dochází vlivem vyšších teplot a probíhající chemických reakcí ke změně struktury zpracovávaného materiálu. Rotační pece jsou například používány během výroby cementu k získání slínku, nebo během výroby oxidu vápenatého (páleného vápna) z vápence. Rovněž nachází využití ve spalovnách nebezpečného odpadu ke spalování odpadu [1].

V rotačních sušících pecích probíhá rotační sušení, jež je jednou z mnoha metod sušení vyskytujících se v jednotkových operacích procesního a chemického inženýrství, kdy dochází k odstraňování vlhkosti ze zpracovávaného materiálu. Rotační sušárny jsou typicky používány v zemědělském průmyslu, k výrobě hnojiv, úpravě krmiv nebo podestýlky. Rovněž jsou široce používány během zpracovatelských procesů minerálů, například k výrobě koksu, sádry, zpracování bauxitu pro získání oxidu hlinitého, nebo odstraňování přebytečné vlhkosti z biomasy, písku, rudy a jiných materiálů [2].

Tato práce se zabývá rotační sušící pecí, rovněž zvané bubnovou sušárnou, kdy je pomocí numerických simulací a dostupného softwaru simulován a sledován pohyb materiálu v rotačním válci bubnové sušárny se zaměřením na stanovení zdržné doby materiálu.

2 Rotační sušící pec

Základními prvky konstrukce rotační sušárny jsou spalovací komora, jež je opatřena hořákem a válcová rotační skořepina, která je osazená na ložiscích a obvykle mírně nakloněná [3]. Základní schéma rotační sušárny je zobrazeno na Obr. 1. Úhel sklonu válcové skořepiny má přímý vliv na rychlost posuvu materiálu a často se odvíjí od dané průmyslové aplikace, přičemž jeho hodnoty se typicky pohybují v rozmezí 1° až 6° [1].



Obr. 1 Jednoduché schéma přímé sou proudé rotační pece, převzato a upraveno z [3]

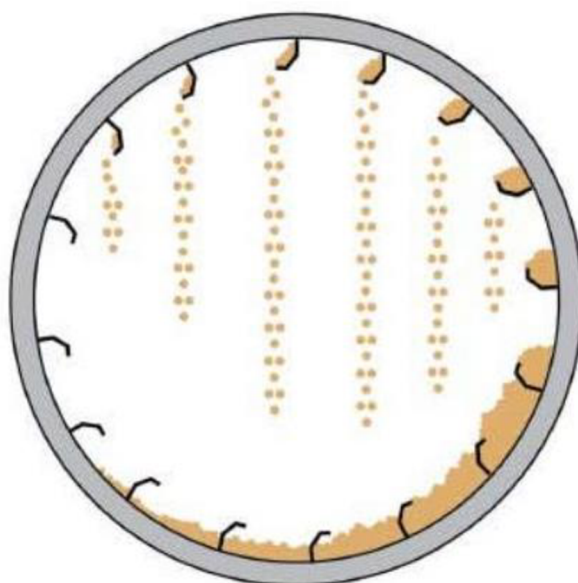
Plášť rotačního válce může být vyroben z celé škály materiálů včetně uhlíkových ocelí, nerezových ocelí, Inconelu a řady dalších slitin. V závislosti na požadavcích zpracovávaného materiálu a daného procesu může být plášť rovněž různě upraven, například obložen izolačními bloky nebo žáruvzdornými cihlami [4].

Ve spalovací komoře probíhá proces spalování, kdy je z paliva a spalovacího vzduchu tvořena směs horkých spalin, jejichž teplota se typicky pohybuje v rozmezí 100 až 400 °C [1], jež následně vstupuje do sušárny. Mokrý vsázka se zavádí do horního konce sušičky, v němž se nachází násypka, kterou je materiál dopraven do rotačního válce a následně vlivem rotace a sklonu pece je transportován podél rotačního válce. Výsledný produkt je odebírán na spodním konci sušárny. Platí pravidlo, že s rostoucí rychlostí rotace a úhlem sklonu zároveň klesá zdržná doba materiálu [3].



Obr. 2 Vnitřní lopatková vestavba rotačního válce [5]

Vnitřek rotačního válce, jak je zobrazeno na Obr. 2, může být opatřen lopatkami, jejichž účelem je zvedání materiálu do výšky a následně rovnoměrné rozsyávání (sprchování) částic v proudu plynu (Obr. 3). Tímto dochází k intenzifikaci kontaktu vlhkých částic s horkým plynem a zvýšení účinnosti celého procesu. Tvar lopatek závisí na vlastnostech sušeného materiálu, přičemž běžnou praxí je, že se lopatková vestavba po délce sušičky mění, tak aby se během sušení přizpůsobila měnícím se vlastnostem materiálu [3].



Obr. 3 Sprchování částic lopatkovou vestavbou, převzato z [4]

2.1 Základní rozdělení rotačních sušáren

Z hlediska směru proudění vzduchu a materiálu lze rotační sušárny rozdělit na souprroudé a protiproudé.

Souproudé – také nazývané paralelními, jedná se o uspořádání, kdy směry toku sušeného materiálu a sušícího vzduchu jsou totožné. V tomto případě dochází k přímému kontaktu

nejteplejšího vzduchu s nejvlhčím materiálem, což má za následek rychlé počáteční sušení a rychlé ochlazování sušícího vzduchu a tím i nižší povrchovou teplotu pláště než u protiproudého uspořádání. Toto uspořádání umožňuje mnohem snazší řízení teploty sušeného materiálu, jež přímo závisí na teplotě vzduchu [4].

Protiproudé – v tomto případě je směr toku sušeného materiálu opačný ke směru proudění sušícího vzduchu. V tomto uspořádání dochází ke kontaktu nejvlhčího materiálu s nejtudenějším vzduchem a zároveň ke kontaktu nejteplejšího vzduchu s nejsušším materiálem [4].

Souproudé uspořádání se používá pro tepelně citlivé materiály a z důvodu rychlého ochlazování plynu během počátečního odpařování povrchové vlhkosti ze sušeného materiálu je vhodné i pro použití vyšších teplot vstupního plynu. V tomto případě tok plynu zároveň zvyšuje rychlost toku pevných látek. Naproti tomu v protiproudém uspořádání tok plynu snižuje rychlost toku pevných látek a zároveň lze dosáhnout vyšší tepelné účinnosti [3].

Z hlediska kontaktu sušícího vzduchu a sušeného materiálu lze rotační sušárny rozdělit na přímé a nepřímé.

Přímé – Dochází k přímému kontaktu a přenosu tepla mezi plynem a pevným materiálem. Tento typ sušáren je konstrukčně jednodušší, jejich provoz je ekonomičtější, avšak v případě že pevná fáze obsahuje extrémně malé částice, hrozí z důvodů vysokých rychlostí sušícího plynu úlet materiálu [3]. Tvoří převážnou část aplikací, umožňují vyšší přenos tepla a jsou široce používány v zemědělství a průmyslu [4].

Nepřímé – Ohřevné médium a sušená pevná fáze jsou oddělené kovovou stěnou nebo trubkou. Jelikož v tomto případě hlavním účelem plynu proudícího v rotačním válci není přenos tepla, ale pouze odvod vznikajících par, lze použít menší proud plynu. Jsou vhodné pro procesy vyžadující speciální atmosféru plynu v kontaktu s vsázkou a zamezení přístupu vnějšího vzduchu. Tento typ rotačních sušáren je vhodnější ke zpracování prašných, jemných a vysoce hořlavých materiálů.

2.2 Pohyb materiálu

Lze rozlišit dva základní směry pohybu materiálu v rotačním válci. První z nich, axiální pohyb částic podél sušičky je dán třemi nezávislými mechanismy [3] uvedenými níže.

Kaskádový pohyb – je přímým důsledkem zvedání částic lopatkami a sklonu sušičky, kdy mohou být částice padající z lopatek unášeny proudícím vzduchem. V případě souproudého uspořádání dochází ke zvýšení posuvu materiálu v důsledku odporu vzduchu, naopak u protiproudého uspořádání může docházet ke zpětnému toku.

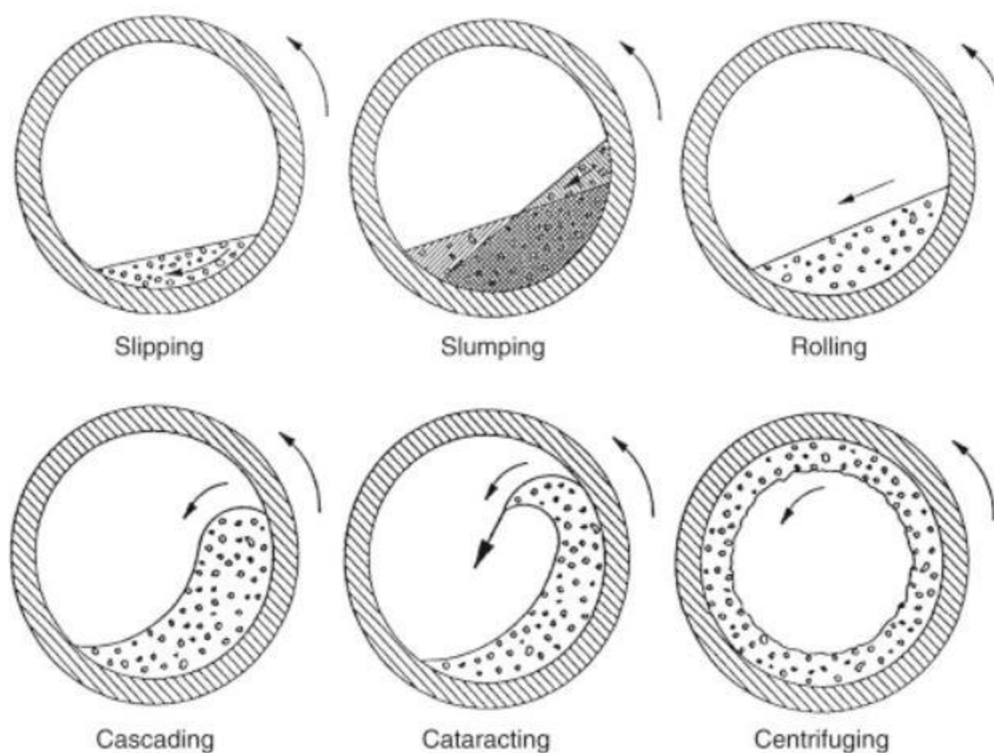
Posuvný pohyb – v tomto případě v důsledku sklonu pece částice kloužou buď po kovovém povrchu nebo po ostatních částicích, směrem k výstupu. K tomuto pohybu dochází vždy, avšak nabývá výrazně na významu v případě, že dochází k přetížení sušičky, což znamená zahlcení materiálem tak, že množství materiálu přesáhne konstrukční určení a již není schopná vytvářet produkt s konstantními vlastnostmi.

Skákavý pohyb – k tomuto pohybu dochází při odrazu částic padajících z lopatkové vestavby nebo násypky od povrchu válce, nebo od usazené vrstvy částic, kde místo usazení částice dojde k jejímu odrazu směrem k ústí rotačního válce v důsledku jeho sklonu.

Druhým základním směrem pohybu materiálu je příčný pohyb, jež odpovídá ve velké míře za promíchání materiálu a je dán přímo rotací válce, při níž materiál stoupá ve směru otáčení, přičemž v okamžiku, kdy je dosaženo sypného úhlu, materiál padá zpět do středu rotačního válce. V příčném pohybu lze rozlišit 6 základních režimů závislých na bezrozměrném Froudově čísle Fr (resp. rychlosti rotace) rotačního válce daného rovnicí (1.3.1) [6] a zobrazených na Obr. 4 kde jednotlivé režimy jsou uvedeny v posloupnosti rostoucí rychlosti rotace.

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (-) \quad (1.3.1)$$

kde ω (rad/s) je rychlost rotace válce, R (m) je poloměr rotačního válce a g (m/s^2) je tíhové zrychlení.



Obr. 4 Jednotlivé režimy příčného pohybu materiálu v rotační peci [6], *slipping* – klouzání, *slumping* – sesouvání, *rolling* – valení, *cascading* – kaskádové valení, *ataracting* – slapování, *centrifuging* – odstředování

V režimu klouzání dochází ke skluzu materiálového lože proti pohybu stěny rotačního válce. Režim sesouvání je charakterizován cyklicky se měnícím sypným úhlem materiálu, kdežto u režimu valení je sypný úhel konstantní a zároveň je i maximalizován efekt promísení materiálu. Použití režimů odstředování a slapování je z důvodu velké prašnosti a problémům s opotřebením zařízení velice vzácné.

2.3 Zdržná doba.

Zdržná doba představuje čas, jež sušený materiál stráví v rotační sušárně. Průměrnou zdržnou dobu materiálu $\bar{\tau}$ (s) lze stanovit rovnicí (2.3.1) jako podíl celkového množství materiálu H (kg) zdržujícího se v sušárně a hmotnostního toku M (kg/s) materiálu dávkovačem.

$$\bar{\tau} = \frac{H}{M} \quad (\text{s}) \quad (2.3.1)$$

Teoreticky lze množství materiálu zadržného v sušárně měřit přímo, ale tento způsobu měření vyžaduje zastavení procesu a úplné vyprázdnění zařízení a následné zvážení materiálu [3]. Jelikož provedení takového měření by bylo velice komplikované, bylo odvozeno několik vztahů pro odhad zdržné doby, jež jsou vyjádřeny jako funkce charakteristik sušárny. Dle [3] lze zdržnou dobu materiálu v rotační sušárně nevybavené lopatkami určit dle vztahu (2.3.2).

$$\tau = \frac{0,031(Ln)^{\frac{1}{2}}}{DN \tan \theta} \quad (\text{min}) \quad (2.3.2)$$

V [7] jsou zmíněny další dva vztahy (2.3.3) a (2.3.4), přičemž druhý z nich zohledňuje i vliv množství materiálu v sušárně.

$$\tau = 1,77 \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\sqrt{n}}{\theta N} \quad (\text{min}) \quad (2.3.3)$$

$$\tau = \frac{0,1026 \cdot L^3}{\dot{V}} \cdot \left(\frac{n}{\theta}\right)^{1,054} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{L^3 \cdot n}\right)^{0,981} \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{1,1} \quad (\text{min}) \quad (2.3.4)$$

kde τ je zdržná doba, L (m), D (m), N (ot/min), θ ($^\circ$) jsou postupně délka, průměr, rychlost rotace a úhel sklonu rotačního válce, n ($^\circ$) je dynamický sypný úhel materiálu a \dot{V} (m^3/min) je objemový průtok sušeného materiálu. Oblast platnosti jednotlivých vztahů ani v jednom případě nebyla uvedena.

Všechny výše zmíněné vztahy udávají střední zdržnou dobu materiálu v zařízení. Distribuci zdržných dob lze odhadnout pomocí disperzních modelů, jako například v [8].

3 Metody používané k simulování toku partikulární látky

Cílem této práce je simulování pohybu materiálu v rotační peci. Jedná se o současné simulování toku/pohybu plynu a sypkého materiálu a jejich vzájemných interakcí. K tomuto jsou používány dva základní přístupy Euler/Euler a Euler/Lagrange.

V přístupu Euler/Euler je pohlíženo na obě fáze, to znamená plyn i pevný materiál, jako na kontinuum. Tento přístup je v souvislosti s rotačními pecemi používán hlavně pro úlohy mezifázového přenosu tepla a pro aplikace vyžadující simulování delšího časového úseku pro získání vypovídajících výsledků o daném procesu.

V přístupu Euler/Lagrange je na plyn pohlíženo jako na kontinuum a pohyb pevné fáze je simulován velkým počtem diskretních částic. Model je zvláště vhodný pro zachycení dynamiky částic, jejich vzájemných interakcí, případně určení stupně promísení materiálu, avšak klade větší nároky na výpočetní techniku. Tento přístup byl rovněž použit v této práci.

3.1 Stručný obecný popis přístupů Euler/Lagrange

Jak bylo řečeno již výše, tento přístup řeší tekutou fázi jako kontinuum, jejíž mechaniku pohybu lze popsat rovnicí kontinuity (3.1.1), vyjadřující zachování hmotnosti proudící tekutiny, a Navier-Stokesovou rovnicí, resp. jejich soustavou (3.1.2-3.1.4), vyjadřující zachování hybnosti proudící tekutiny, které jsou zde vyjádřeny v tzv. konzervativní formě [9].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (\text{kg}/(\text{m}^3 \text{s})) \quad (3.1.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (\text{N}/\text{m}^3) \quad (3.1.2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (\text{N}/\text{m}^3) \quad (3.1.3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (\text{N}/\text{m}^3) \quad (3.1.4)$$

kde ρ (kg/m^3) je hustota fáze, \vec{v} (m/s) je vektor rychlosti fáze a u , v , w představují jeho jednotlivé složky, S_m ($\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$) reprezentuje přenos hmoty do kontinuální fáze například v důsledku odpařování, nebo v opačném směru v důsledku kondenzace, p (Pa) je statický tlak, τ_{xx} (N/m^2) jsou složky tensoru viskózního napětí, ρ je (kg/m^3) hustota a f_x , f_y , f_z , (N/m^3) jsou jednotlivé složky objemové síly působící na kontrolní objem. Jedná se o obecný zápis pohybových rovnic a rovnic kontinuity pro proudění tekutiny se zanedbatelným objemovým podílem dispergované fáze. V případě že nelze objemový podíl zanedbat, je zápis principiálně stejný, ale je nutné informaci o objemovém podílu zahrnout do rovnic prostřednictvím objemových zlomků. Potom

podíl každé z fází q , α_q (-) v dané buňce kontrolního objemu je dán pomocí objemových zlomků, pro něž platí:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (-) \quad (3.1.6)$$

A pro objem obsazený fází q , V_q (m^3) v dané buňce kontrolního objemu potom platí:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (\text{m}^3) \quad (3.1.7)$$

Na základě výběru konkrétních modelů budou rovnice konkretizovány v kapitole 5.

Pevná fáze je řešena v tzv. Lagrangeovském rámci pomocí velkého množství diskretních částic, jež se pohybují v rychlostním poli plynné fáze a jejich pohyb je dán rovnicí druhého Newtonova zákona (rovnice 3.1.5), kde m (kg) je hmotnost částice, \vec{a} (m/s^2) je vektor zrychlení částice a \vec{F} (N) je vektor síly působící na částici. Trajektorie pevných částic v proudu tekutiny je stanovena v důsledku působení širokého spektra sil, jimiž mohou být gravitační síla, odporová, vztaková, kohezní nebo síla vznikající v důsledku vzájemného kontaktu částic.

$$m\vec{a} = \sum \vec{F} \quad (\text{N}) \quad (3.1.5)$$

K simulování pevné fáze jsou nejčastěji používány sférické částice, ale v odborné literatuře se objevují i simulace, které používají například multisférické částice tvořené několika spojenými menšími sférickými částicemi [10] nebo částice obdélníkového tvaru [11].

K zachycení vzájemných interakcí mezi částicemi se v tomto přístupu nejčastěji používá metoda diskretních prvků DEM (Discrete Element Method). Tato metoda umožňuje simulování kontaktních sil působících na částice v důsledku jejich vzájemných interakcí a interakcí s okolní geometrií. Jedná se o nejpresnější, avšak i o výpočtově nejnáročnější způsob modelování vzájemných interakcí mezi částicemi.

3.2 Simulace jiných autorů zaměřené na rotační válce

V odborné literatuře lze nalézt mnoho prací pojednávajících o simulacích toku partikulární látky ve válcové rotační sušící peci nebo obdobných systémech. Tyto práce lze primárně rozdělit do dvou kategorií.

První z nich je dominantně zaměřená na samotný pohyb materiálu v rotačním válci, tudíž se jedná primárně o simulace pevných částic. K tomuto je primárně využíván DEM model kolizí, avšak je zde možné najít i práce, v nichž je na sypký materiál pohlíženo jako na kontinuum [12]. V těchto simulacích bývá často zkoumán vliv geometrie a rychlosti rotace bubnu [13], [14], jak i samotných fyzikálních vlastností částic (hustota, velikost a povrchová energie částic) [15] na probíhající procesy. V některých případech se studie zabývají i zkoumáním přesnějších

tvarových aproximací částic [10], [16], jež mají za úkol nahradit nejčastěji používané aproximace sférickými částicemi. Často pozorovanými jevy jsou samotné mechanismy pohybu částic [17] a mísení částic [18], jak i jejich závislost na výše popsanych veličinách. Součástí těchto modelů může být i přenos tepla vedením v důsledku kontaktu mezi částicemi [19], nebo může být rovněž uvažován vliv kapilární síly vznikající v důsledku kontaktu vlhkých částic [20].

Použitelnost a přesnost výsledků získaných těmito simulacemi do velké míry závisí na zvolených parametrech DEM modelu kolizí, přičemž nalezením vhodných hodnot těchto parametrů se rovněž zabývá několik studií. Ve [21] je například provedena série simulací s různými hodnotami parametrů DEM modelu kolizí volených na základě rešerše podobných prací, jejichž výsledky jsou následně porovnávány s výsledky experimentálních měření. Naopak v [22] byla nejdříve provedena série experimentálních měření a simulací ke stanovení vhodných hodnot parametrů DEM modelu a teprve potom bylo přistoupeno k simulaci a zkoumání mísení dvou různých materiálů v rotačním bubnu.

Druhá kategorie odborných studií je zaměřena na přenos tepla a hmoty v důsledku probíhajícího sušícího procesu a týká se modelování dvoufázového toku plynu a pevných částic. Zde převažuje kombinace modelu DEM-CFD, kdy je použito DEM k modelování pohybu pevných částic a CFD k zachycení proudění plynu a přenosu tepla [23], [24], nebo případně i přenosu hmoty v důsledku odpařování vlhkosti ze sušeného materiálu [11]. Avšak lze zde najít i trochu odlišný přístup [25], kde je nejprve simulován pohyb materiálu pomocí běžného DEM modelu, jež následně slouží k efektivnějšímu nastavení modelu přístupu Euler-Euler k zachycení přenosu tepla.

Výsledky těchto simulací v porovnání s experimentálními daty ukázaly, že tyto modely jsou schopny adekvátně zachytit chování materiálu a umožňují bližší nahlédnutí do procesu a studium mechanismů, jež běžným přímým pozorováním není možné zachytit. Tyto simulace jsou však časově velmi náročné. Délka výpočtu obvykle závisí na počtu částic, velikosti výpočtové sítě, jak i na velikostech časových kroků výpočtu a celkové simulované době. V neposlední řadě klíčovým parametrem určující délkou simulace je výkon dostupné výpočetní techniky. Výpočtové časy jednotlivých výše zmíněných simulací (pokud byly autorem zmíněny), jak i základní parametry modelu a výsledky jednotlivých studií, jsou uvedeny níže v Tab. 1 a hodnoty parametrů DEM modelu kolizí různých materiálů, použité v simulacích jsou uvedeny v Tab. 2.

Z výše zmíněných studií je patrné, že k řešení pevné fáze bylo ve většině případů použito množství částic pohybující se v řádu desítek tisíc. Vzhledem k uváděné celkové výpočetní době, by z hlediska časové náročnosti bylo vhodné řádově stejné množství částic použít i v této práci. Dále je nutno pro tyto částice vhodně zvolit s ohledem na druh simulovaného materiálu parametry modelu kolizí a z hlediska stability výpočtu je nutno k řešení kontinuální fáze použít síť, jež bude mít jednotlivé buňky kontrolního objemu násobně větší, než je průměr simulovaných částic.

Reference	Cíle	Metoda	Software	Model	Doba simulace	Výsledky
[15]	Zjištění vlivu vlastností částic (hustota, průměr a povrchová energie) na mísení materiálů v rotační peci.	DEM	EDEM Academic DEM	naplněnost 35%, 1296 - 10365 částic, průměr částic 4mm 6mm a 8mm, průměr bubny 9,5cm, délka bubny 30cm	Provedeno 12 simulací s celkovým výpočtovým časem 2762h, reálný čas simulace 1 až 5 min	Axiální rozptýlení (disperze) a součinitel promísení se značně zvyšují s poklesem hustoty částice, povrchové energie a s růstem průměru částice.
[25]	V tomto článku byl představen nový přístup kombinující 2D DEM a 3D CFD. Nejprve byla provedena 2D DEM simulace, jež byla použita k přesnějšmu nastavení 3D CFD modelu pro celou pec.	2D DEM pro vrstvy lože a 3D CFD pro celou pec	CSIRO DEM software, CFX	fine grained cylindrical grid, 30 buněk na průměru pece po obvodě sizing 0,07m (sít' určená pro průměrování hodnot), průměr válce 2m, základní simulace 1700 částic o průměru 20mm, později počet částic 100 až 60000 - tomu odpovídající průměry částic 2,5mm až 80mm	simulovaný čas pro základní DEM simulaci 60s, pro přenos tepla 3 až 4 min, typický se doba výpočtu pohybovala jak pro DEM tak CFD v řádu hodin	2D DEM byla použita k získání středních rychlostí pevné fáze pro různé rychlosti rotace a velikosti částic, jež byly následně použity pro nastavení a vyhodnocení CFD modelu. Obdobně bylo postupováno i pro přenos tepla.
[10]	Zkoumání vlivu žeber a tvaru částic na rozřídění částic.	DEM	LIGGGHTS	Tetrahedrální sít', 8208 částic, geometrie - průměr bubny 0,31m délka 2,4m, žebra - výška 5cm tloušťka 5mm, průměr sférických částic 25 mm a 18,28mm, multisférická částice 20x20x8 složené z 50 sférických částic o průměru 4mm	2 dny pro sférické částice, 2 týdny pro multisférické částice	Popis jednotlivých režimů pro různé rychlosti a počty částic, porovnání výsledků sférických a multisférických částic. Pro nízké rychlosti rotace je tvar částic důležitý, avšak s rostoucí rychlostí rotace význam tvaru postupně klesá a obě částice vykazují podobné chování
[12]	Zkoumání pohybu partikulárních částic v rotační peci ve válivém režimu.	Euler/Euler dvoufázový tok a kinetická teorie toku partikulárních látek	Fluent 6.3.26	Geometrie - průměr 0,406m délka 5.5m, strukturovaná sít' 90000 buněk, větší hustota sítě v aktivní vrstvě lože, průměr částice 2,5mm, naplnění 15%, časový krok 10^{-4} , rezidua nastavená na 10^{-4}	neuvedena	K ustálení chování modelu došlo přibližně po 8,5s reálného času. Ze simulace vyplývá, že příčný průřez materiálu lze rozdělit do dvou částí: tlusté pasivní vrstvy u stěny pece a horní relativně tenké aktivní vrstvy v níž dochází k mísení částic a přenosu tepla. Výsledky simulace byly porovnávány s experimentálními daty (panovala rozumná shoda).

Tab. 1 Shrnutí informací z rešerše o studiích se simulacemi rotačních pecí

Reference	Cíle	Metoda	Software	Model	Doba simulace	Výsledky
[17]	Použití experimentálních metod a numerických simulací k lepšímu pochopení pohybu částic a jejich mechanickými interakcí v rotační peci.	DEM	District element code of LEAT	délka bubnu 20xprůměr částice, průměry bubnu 200mm 300mm a 400mm, poměr D/d 28,57 až 113,33, naplnění 10% a 20%, 2500 až 65000 částic	neuvejena	Z porovnání s experimentálními daty je zřejmé, že DEM je schopno kvantitativně reprodukovat příčný pohyb materiálu v rotačních bubnech (syprný úhel, tloušťka aktivní vrstvy (s rostoucí naplněností bubnu se zmenšuje), rychlosti částic a frekvence rozdělení rychlosti).
[11]	Simulace pomocí CFD a DEM sušení dřevěných pelet v rotační sušárně. Součástí DEM je i přenos tepla a hmoty v jednotlivých částicích.	DEM/CFD	Ansys Fluent 14.0, DEM kód Ruhr-University Bochum	časový krok pro mechanický kontakt DEM 10^{-4} , pro DEM přenos tepla a hmoty uvnitř částice 3×10^{-4} , synchronizační krok mezi CFD a DEM je 0,1s, 2000 částic obdélníkového tvaru 22x7,7x3,1 mm, CFD síť 100000 buněk, 736 buněk na každé částici, geometrie zahrnovala lopatky, průměr bubnu 0,3m	pro 2000 částic 60s simulace probíhala 3 týdny	Žebra zvyšují účinnost sušení, získána data je ale nutno experimentálně ověřit. Redukce modelu na simulaci pouze jedné částice – pokles výpočtového času o dva řády, aplikovatelné pouze na specifické případy.
[21]	Zkoumání chování materiálu v rotační sušárně zpracovávající superfosfát pomocí experimentálních metod a simulací DEM-CFD.	DEM/CFD	Ansys Fluent 14.0.	Polyblivá síť, s rychlosti rotace stejnou jako geometrie, velikost buněk alespoň 3x větší než průměr částice, 9338 buněk, 20583 částic, časový krok pro CFD 10^{-3} , časový krok pro DEM 10^{-4} , průměr bubnu 0,3m, délka bubnu 1,5m, průměr částice 4,88mm $\pm 5\%$, součástí geometrie jsou i lopatky	neuvejena	Celkem bylo provedeno 45 simulací pro 15 různých nastavení modelu. Výsledky simulací byly následně porovnávány s daty získanými experimentálními měřeními. Na základě naměřených hodnot dynamického syprného úhlu a množství zadržovaných částic na lopatkách bylo vybráno nejvhodnější nastavení parametrů modelu: konstanty tuhosti, součinitele tření a koeficientu restituice.
[20]	Zkoumání vlivu koheze, rotační rychlosti a stupně naplnění bubnu na promísení vlhkých částic v rotačním bubnu.	DEM	Vlastní (dedikovaný) DEM program, vytvořený autory práce	Průměr bubnu 70 mm, délka bubnu 26 mm, průměr částic 1,3 mm, počet částic 15000 až 47000	pro 1 vteřinu skutečného času simulace probíhala 4 až 15 hodin	Promísení klesá se zvětšujícím se povrchovým napětím a se zvětšujícím se naplněním bubnu. Difuzní pohyb v radiálním směru klesá se zvětšujícím se povrchovým napětím. Konvekce v tangenciálním směru vykazuje cyklické chování.

Tab. 1 Shrnutí informací z rešerše o studiích se simulacemi rotačních pecí

Reference	Cíle	Metoda	Software	Model	Doba simulace	Výsledky
[24]	Využití CFD/DEM k simulování konduktivity a konvekce tepla v rotační peci, použity tři různé materiály částic: sklo, ocel, hliník	DEM/CFD	neuveđen	Časový krok DEM 10^{-6} , CFD 5×10^{-4} , pravouhlá síť s šířkou buněk 3x větší než velikost částice, po stranách jsou přidány další čáry, tak aby plášť neprotínal žádnou hranu kontrolního objemu, ale pouze uzly. Průměr bubny 136 mm a průměr částic 3 mm	neuveđena	Při nízkém součiniteli tepelné vodivosti částic je přenos tepla uskutečňován hlavně v rozhraní plyn-pevná částice, při vyšším součiniteli tepelné vodivosti materiálu částic dominantní roli získává přenos tepla mezi pevnými částicemi.
[16]	Experimentální a numerické zkoumání axiálního roztržení dvousložkové směsi tvořené sférickými a nesférickými částicemi	DEM	LIGGGHTS	Multisférické částice jsou tvořené třemi spojenými sférickými částicemi o průměru 6 mm (celková délka částice je tedy 12 mm), sférické ocelové částice o průměru 5,4 mm, časový krok $2,5 \times 10^{-5}$,	24 h k dosažení ustáleného stavu (asi 16 vteřin) mísení ocelových kuliček a dřevěných pelet (multisférických)	Multisférická aproximace odpovídá naměřeným datům, sférická aproximace měla rozdílné výsledky v závislosti na zvolených koeficientech tření (jednou voleno na základě naměřených hodnot sypného úhlu a střední excentricity, podruhé pouze na základě naměřených hodnot sypného úhlu).
[14]	Odhad různých režimů chování (pohybu) částic v rotačním bubnu o elipsoidálním průřezu v závislosti na rychlosti rotace a zploštění bubnu	DEM	neuveđen	průřez bubnu má tvar elipsy hlavní osa 108,465 mm a vedlejší osa 92,195 mm, délka bubnu 45 mm, 2500 modrých a 2500 zelených částic o průměru 3 mm, naplnění 20 % objemu,	pro 1 vteřinu simulace výpočet probíhal po dobu 3 h	Vypočítané data byly porovnávány s chováním rotačního bubnu s cylindrickým průřezem daného simulacemi jiných autorů.
[18]	Využití DEM ke zkoumání mísení lože tvořeného sférickými skleněnými částicemi (1 až 5 různých průměrů částic a různé počáteční uložení), porovnání s experimentálními daty	DEM	EDEM Simulation software	průměr bubnu 104 mm, délka bubnu 229 mm, průměr částic 2 mm až 10 mm, počet částic 17195 až 44296, časový krok 2×10^{-6} , síť pro výpočet stupně promísení obsahovala $12 \times 12 \times 1$	Výpočtové časy jednotlivých simulací se pohybovaly v rozmezí 24 až 48 h pro 20sekundovou simulaci	Simulace ukázaly, že s rostoucí polydisperzitou materiálu klesá stupeň promísení. Menší částice mají tendenci zadržovat se ve středu míchaného materiálu, větší částice u stěny. Mezi výsledky simulací a experimentů panovala přijatelná shoda.

Tab. 1 Shrnutí informací z rešerše o studiích se simulacemi rotačních pecí

Reference	Cíle	Metoda	Software	Model	Doba simulace	Výsledky
[13]	Simulování pohybu částic v rotační sušárně (zemědělská semena), posouzení účinnosti sušárny v závislosti na počtu, typu a umístění lopatek	DEM	EDEM Simulation software	délka bubny 1,1 m, průměr 0,3 m, 8 až 18 přepážek 20x10 mm, nestrukturovaná ortogonální síť s 204 000 buňkami, časový krok 4×10^{-5} , průměr částice 4,5 mm, částice vstříkovány do systému s hmotnostním tokem 0,05 kg/s	Výpočtový čas 100 vteřin simulace se pohyboval v rozmezí 10-18 h.	Rychlost pohybu částic v axiálním směru roste se zvětšujícím se úhlem sklonu sušárny, s rostoucí rychlostí rotace klesá počet částic zdržujících se na lopatkách, při vyšším počtu lopatek jsou částice rovnoměrněji rozloženy v celém průřezu
[23]	Simulování přenosu tepla v bubnové sušárně, zpracovávající směs (písek a drcený kámen) určenou k výrobě asfaltu.	DEM/CFD	Fluent, EDEM	Průměr částic 25,4 mm, každou vteřinu je do systému přidáno 3 040 částic, hybridní tetrahedrální a hexahedrální síť čítající celkem 2,17 milionu buněk, CFD časový krok 0,1 s, DEM časový krok 0,00025 s, geometrie zahrnuje i hořák, násypku a lopatkovou vestavbu.	neuveдена	Z porovnání s experimentálními daty je zřejmé, že simulace dokázala zachytit dominantní konvektivní způsob přenosu tepla, avšak teploty plynu i částic predikované modelem jsou vyšší než ve skutečnosti, což je zřejmě způsobeno zanedbáním odpařování vlhkosti z materiálu a s tím spojeného výparného tepla.
[19]	Sledování mísení a vedení tepla ocelových částic v rotační peci, v závislosti na měnící se rychlosti rotace pece.	DEM	neuveđen	Průměr částic 1,2 mm, celkový počet částic 90 601, časový krok DEM 5×10^{-6} m, rychlost rotace 0,5 až 3 rad/s	25vteřinová simulace na jednom CPU probíhala 1 měsíc	Efektivita mísení je při nízkých rychlostech velice malá, s rostoucí rychlostí rotace efektivita mísení roste, avšak postupně klesá účinnost dalšího zvyšování otáček na růst efektivity mísení. Efektivita mísení částic má větší vliv na přenos tepla kondukcí než doba trvání kontaktu mezi částicemi.
[22]	Stanovení parametrů DEM modelu kolizí v rotačním bubnu během mísení písku a šterku, pomocí kombinace experimentálních měření a DEM simulací. Následně zkoumání vlivu počtu lopatek, rychlosti rotace a průměru bubnu, jak i zároveň poměru počtu částic písku a šterku na promísení směsi	DEM	EDEM	Průměr bubnů 200, 300, 400 mm, geometrie obsahuje i lopatky, sférické částice písku průměr 2 mm, pro šterk použito více aproximací-sférické, elipsoidální, diskové, trojúhelníkové částice.	neuveдена	Největší vliv na promísení směsi má rychlost rotace bubnu a naopak nejmenší vliv má velikost průměru bubnu.

Tab. 1 Shrnutí informací z rešerše o studiích se simulacemi rotačních pecí

Reference	Materiál	Hustota (kg/m ³)	Konstanta tuhosti (N/m)	částice-částice			částice-stěna		
				Koeficient restituce (-)	Koeficient smykového tření (-)	Koeficient válivého odporu (-)	Koeficient restituce (-)	Koeficient smykového tření (-)	Koeficient válivého odporu (-)
[15]	sklo	2 650	-	0,81	0,35	0,02	0,81	0,35	0,02
[25]	teoretické hodnoty, nereprezentují konkrétní materiál	2 700	100 000 a 50 000	-	0,5	-	-	0,5	-
[21]	superfosfát	1 845	400	0,2	0,2	-	0,2	0,2	-
[20]	-	2 500	-	-	0,4	0,001	-	0,5	0,001
[13]	zemědělská semena	1 193	-	0,5	0,6	0,1	0,65	0,3	0,1
[23]	směs pro výrobu asfaltu	2 900	-	0,45	0,55	0,3	0,5	0,45	0,3
[19]	ocel	7 800	10 000	0,95	0,3	-	-	-	-
[22]	písek	2 368	-	0,48	0,57	-	0,41	-	0,062
[22]	šterk	2 837	-	0,62	0,607	-	0,65	-	0,068

Tab. 2 Parametry DEM modelu použité ve výše zmíněných studiích

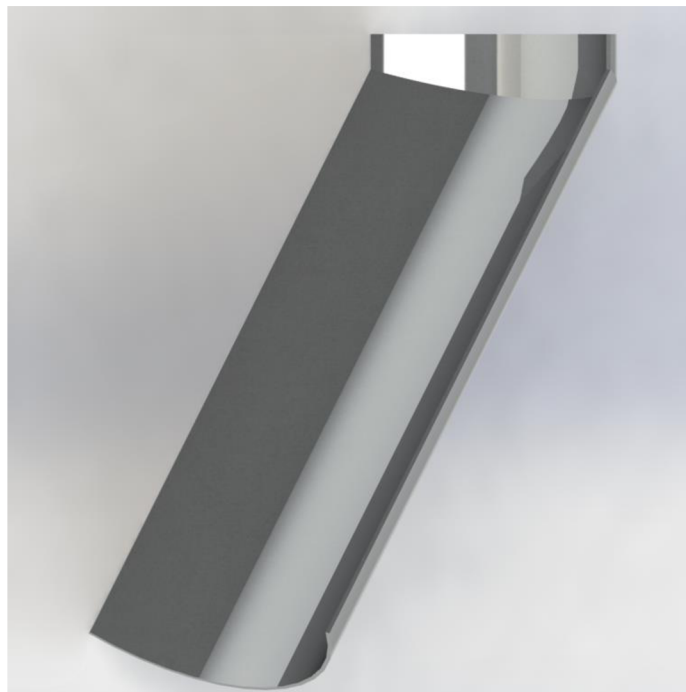
4 Popis řešené rotační pece

Předmětem zájmu této práce je bubnová sušárna nacházející se na Ústavu procesního inženýrství. Jedná se o rotační sušící pec, použitelnou v souproutém i protiproutém uspořádání, s možností regulace úhlu sklonu i rychlosti rotace bubnu, jež může být opatřen vyměnitelnou lopatkovou vestavbou. Mnohé parametry i provozní podmínky sušárny byly převzaty z diplomové práce [26], v níž autor na této bubnové sušárně prováděl sérii měření zaměřených na stanovení zdržné doby písku a vyhodnocení sušícího procesu vlhkých drcených tetrapacků.

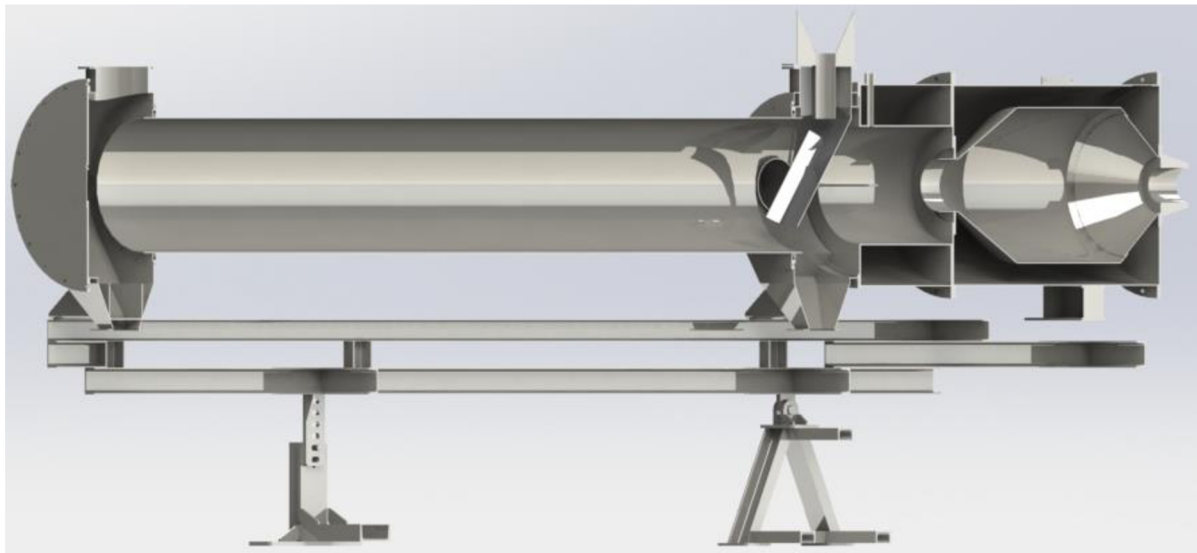
První ze zmíněných experimentů, čili stanovení zdržné doby písku v bubnu sušárny, bude rovněž proveden v této práci pomocí numerických simulací a přístupu Euler/Lagrange. Pro tento účel je nutno nejprve vytvořit geometrii reprezentující průtočný objem zařízení, následně vygenerovat výpočtovou síť, zvolit vhodné nastavení fyzikálního modelu a definovat okrajové podmínky.

4.1 Geometrie

Geometrie reprezentující průtočný objem sušárny použitá k simulacím byla vytvořena na základě dostupného 3D modelu sušárny. Součástí tohoto modelu nebyla násypka, sloužící k dopravě sušeného materiálu do rotačního válce, proto bylo nutno ji domodelovat. Zjednodušený 3D model násypky (Obr. 5) byl vytvořen v programu Solidworks na základě dostupné výkresové dokumentace a následně byl začleněn do celkového modelu sestavy rotační sušící pece (Obr. 6).



Obr. 5 Zjednodušený 3D model násypky

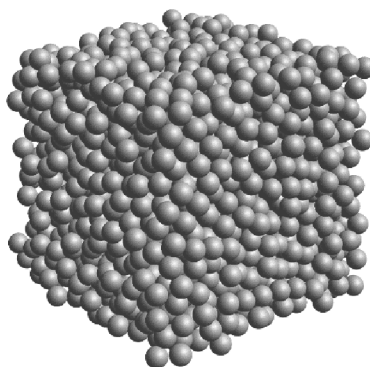


Obr. 6 Řez modelem rotační sušící pece

Samotný kontrolní objem použitý k simulacím sestává z rotačního válce o průměru 502 mm a délce 3500 mm a válcové vstupní komory o průměru 585 mm a délce 307 mm, jejíž součástí je i výše zmíněná násypka. Pro účel simulací byla násypka dále zjednodušena do formy plechu nekonečně malé tloušťky a rovněž byl zanedbán vliv všech bočních otvorů a hrdel na proudění plynu ve válcové vstupní komoře. Bylo ponecháno pouze jedno krátké hrdlo o průměru 100 mm a výšce 5 mm umístěné nad násypkou v horní části vstupní komory, jež slouží k dávkování částic do sušárny.

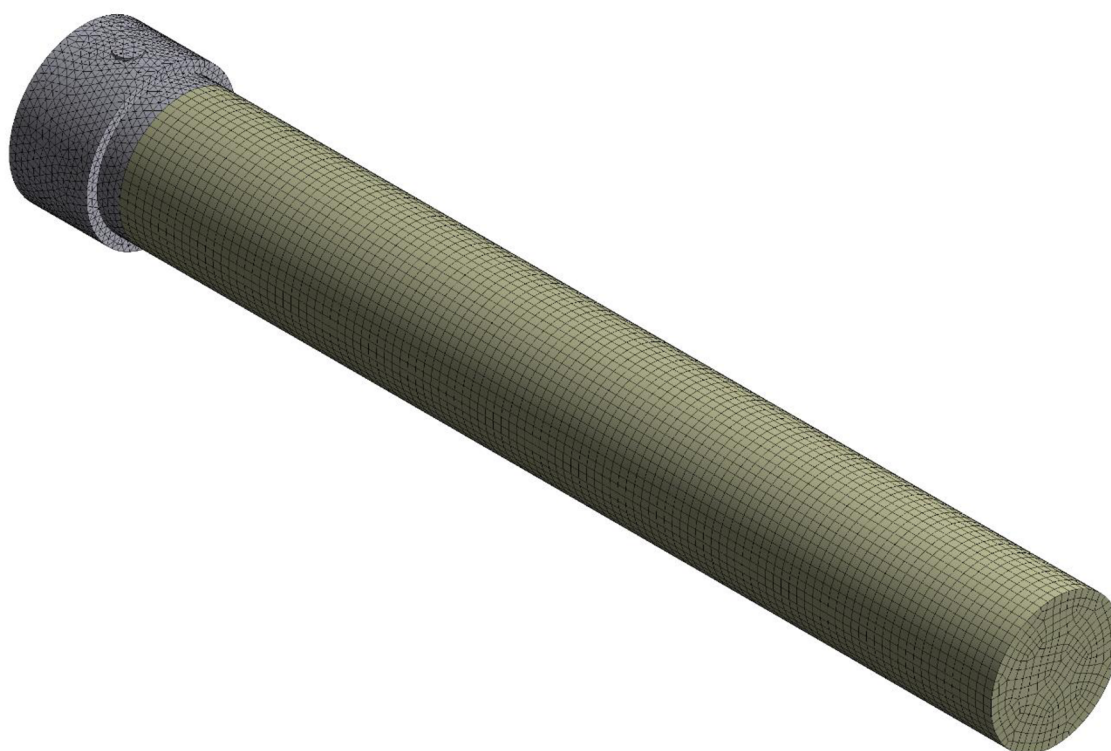
4.2 Výpočtová síť

Hlavním požadavkem kladeným na výpočtovou síť určenou pro CFD-DEM výpočty je, aby jednotlivé buňky kontrolního objemu byly větší než průměr částic. Tento požadavek vyplývá z mechanismu výpočtu, kdy objemový podíl jednotlivých fází je počítán pro každou buňku zvlášť. Pokud by částice byly větší než buňky výpočtové sítě, potom objemový podíl pevné fáze by se blížil 1, přičemž fyzikálně reálnou hodnotou pro případ sférických částic je přibližně 0,6 v závislosti na způsobu uložení částic v jednotkovém objemu [27]. Toto číslo vychází z faktu, že volně uložené částice (Obr. 7) vlivem svého tvaru nejsou schopny zcela vyplnit prostor, v němž se nacházejí, ale vznikají mezi nimi mezery vyplněné vzduchem.



Obr. 7 Uložení volně sypaných částic, převzato z [28]

Pokud jsou buňky kontrolního objemu příliš malé, simulace obtížně konverguje. Naopak, jestliže jsou buňky příliš velké, dochází k poklesu přesnosti řešení proudění díky hrubé prostorové diskretizaci domény [29]. Jedná se proto o nalezení kompromisu mezi konvergencí a dostatečným rozlišením rychlostního pole. Z tohoto důvodu autoři používají buňky násobně větší, než je průměr částic, např. 4krát větší jako v publikaci [30], 5 až 10krát větší jako v [29], nebo 3krát větší jako v [21]. Toto bylo rovněž bráno v úvahu v této práci během tvorby výpočtové sítě modelu.



Obr. 8 Vytvořená výpočtová síť

K výpočtu byla použita hybridní tetrahedrální a hexahedrální síť zobrazená na Obr. 8 s celkovým počtem 65 721 buněk. Pro vstupní komoru a krátkou přední část rotačního válce, v němž se nachází i násypka, byla použita z důvodu větší složitosti geometrie síť tetrahedrální, kdežto pro zbylou dominantní část rotačního válce (o celkové délce 3 360 mm) byla použita hexahedrální síť s celkovým počtem 32 480 buněk. Výsledné hodnoty základních metrik kvality sítě jsou uvedeny v Tab. 3.

Parametr	Průměrná hodnota	Nejhorší hodnota	Podíl částic s nejhorší hodnotou (%)
Ortogonalita (Orthogonality)	0,876	0,18	0,054
Šikmost (Skewness)	0,187	0,82	0,054
Kvalita elementu (Element quality)	0,89	0,211	0,023

Tab. 3 Základní metriky kvality sítě

4.3 Provozní podmínky

Jak bylo zmíněno výše provozní podmínky, jako rychlost rotace, úhel sklonu rotačního válce a hmotnostní tok materiálu byly převzaty z diplomové práce [26], přičemž bylo zvoleno nastavení, pro něž bylo dosaženo nejkratší zdržné doby. Rovněž byla převzata i v práci zmíněná teplota okolního vzduchu 22,5 °C, dle které byly určeny hodnoty hustoty ρ_g (kg/m³) a dynamické viskozity μ_g (Pa.s) proudícího vzduchu. Souhrn hodnot těchto parametrů je uveden níže v Tab. 4.

Parametr	Hodnota
n (ot/min)	6,1
α (°)	3,1
m (kg/s)	0,2
ρ_g (kg/m ³)	1,194
μ_g (Pa.s)	1,829 2 e-05

Tab. 4 Převzaté provozní parametry

5 Volba a nastavení fyzikálního modelu

K simulacím byl zvolen jeden z dostupných modelů v programu Ansys Fluent [31], jež umožňuje simulování dvoufázového proudění s možností zapojení i DEM modelu kolizí. Jedná se o Dense Discrete Phase Model. Níže jsou uvedeny základní rovnice, s nimiž tento model pracuje.

5.1 Rovnice plynné fáze

Plynná fáze je popsána v Eulerovském rámci (řešena jako kontinuum) pomocí rovnice kontinuity (5.1.1) a Navier-Stokesovy rovnice (5.1.2), jež zohledňují i mezifázový přenos hybnosti (pro jednoduchost zapsány v kompaktní tenzorové formě, jak je rovněž uvádí i [32]).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = \dot{m}_{pg} - \dot{m}_{gp} \quad (\text{kg}/(\text{m}^3 \text{s})) \quad (5.1.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = & -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T)] \\ & + \alpha_g \rho_g \vec{g} + K_{sg}(\vec{v}_p - \vec{v}_g) + \dot{m}_{pg} \vec{v}_{pg} \\ & - \dot{m}_{gp} \vec{v}_{gp} + S_{DPM,explicit} \quad (\text{N}/\text{m}^3) \end{aligned} \quad (5.1.2)$$

kde α_g je objemový zlomek plynné fáze, ρ_g (kg/m³) je hustota plynu, p (Pa) je tlak plynu, \vec{v}_p a \vec{v}_g (m/s) jsou rychlost částice a rychlost proudění plynu, μ_g (Pa.s) je dynamická viskozita plynu a \vec{g} (m/s²) reprezentuje gravitační zrychlení, K_{sg} (kg/(m³.s)) je koeficient mezifázové výměny hybnosti dán rovnicí (5.4.2). Veličina \dot{m}_{pg} (kg/(m³.s)) reprezentuje přenos hmoty

z pevné fáze do plynné fáze a \dot{m}_{gp} (kg/(m³.s)) je přenos hmoty z plynné fáze do pevné fáze. $S_{DPM,explicit}$ (N/m³) je explicitní zdrojový člen výměny hybnosti. Veličiny \vec{v}_{pg} a \vec{v}_{gp} (m/s) představují mezifázovou rychlost definovanou následovně: pokud $\dot{m}_{pg} > 0$ (tudíž je přenášena hmotnost z pevné fáze do plynné fáze) potom $\vec{v}_{pg} = \vec{v}_p$, pokud $\dot{m}_{pg} < 0$ (tudíž je přenášena hmotnost z plynné fáze do pevné fáze) potom $\vec{v}_{pg} = \vec{v}_g$, obdobně platí i pro \vec{v}_{gp} ,

5.2 Rovnice pevné fáze

Pohyb částic je dán diferenciálními rovnicemi, jež vychází z Newtonova druhého zákona. Pro rovnováhu sil působících na částici je použita rovnice (5.2.1).

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = m_p \frac{(\vec{v}_g - \vec{v}_p)}{\tau_r} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} + \vec{F}_{kol} \quad (\text{N}) \quad (5.2.1)$$

kde \vec{v}_p (m/s) je rychlost částice, \vec{v}_g (m/s) je rychlost plynu, ρ_p (kg/m³) je hustota materiálu částice, ρ_g (kg/m³) je hustota plynné fáze, \vec{F}_{kol} (N) je síla vznikající v důsledku kolizí částic a τ_r (s) je charakteristický čas částice (particle relaxation time) daný rovnicí:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_g C_D Re_p} \quad (\text{s}) \quad (5.2.2)$$

Kde d_p (m) je průměr částice, Re_p (–) je relativní Reynoldsovo číslo dané vztahem (5.4.3) a C_D (–) je koeficient odporu daný rovnicí (5.4.1).

Rotace částice, jež má zásadní vliv na pohyb materiálu je řešena pomocí rovnice (5.2.3).

$$I_p \frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \frac{\rho_g}{2} \left(\frac{d_p}{2}\right)^5 C_\omega |\vec{\Omega}| \cdot \vec{\Omega} \quad (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}) \quad (5.2.3)$$

Kde I_p (kg.m²) je moment setrvačnosti částice, $\vec{\omega}_p$ (rad/s) je úhlová rychlost částice, d_p (m) je průměr částice, C_ω (–) součinitel rotačního odporu, jež je dán rovnicí (5.3.1), $\vec{\Omega}$ (rad/s) je relativní úhlová rychlost na rozhraní plyn–částice daná vztahem (5.2.3):

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{v}_g - \vec{\omega}_p \quad (\text{rad/s}) \quad (5.2.4)$$

5.3 Koeficient rotačního odporu

V použitém softwaru je dostupný jeden model výpočtu koeficientu rotačního odporu C_ω (–). Vztah (5.3.1) uvedený níže platí pro rotační Reynoldsovo číslo dané vztahem (5.3.2) v rozmezí $20 < Re_\omega < 1000$.

$$C_\omega = \frac{6,45}{\sqrt{Re_\omega}} + \frac{32,1}{Re_\omega} \quad (–) \quad (5.3.1)$$

$$\text{Re}_\omega = \frac{\rho_g |\vec{\Omega}| d_p^2}{4\mu_g} \quad (-) \quad (5.3.2)$$

5.4 Koeficient odporu a mezifázového přenosu hybnosti

Odpor je hlavní příčinou přenosu hybnosti mezi plynem a pevnou fází, s tím jsou spojené koeficient odporu C_D (-) a koeficient mezifázového přenosu hybnosti K_{sg} (kg/(m³.s)), pro které je ve Fluentu k dispozici několik modelů. Pro účely této diplomové práce byl zvolen model Wen Yu, který je dán vztahy (5.4.2) a (5.4.3) ve formulaci pro sférické částice.

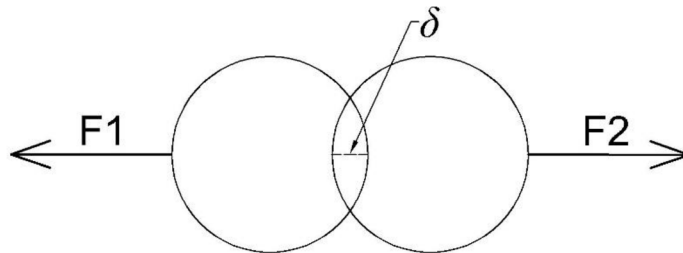
$$C_D = \frac{24}{\alpha_g \text{Re}_p} \left[1 + 0,15(\alpha_g \text{Re}_p)^{0,687} \right] \quad (-) \quad (5.4.1)$$

$$K_{sg} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_p \alpha_g \rho_g |\vec{v}_p - \vec{v}_g|}{d_p} \alpha_g^{-2,65} \quad (\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})) \quad (5.4.2)$$

$$\text{Re}_p = \frac{\rho d_p |\vec{v}_p - \vec{v}_g|}{\mu_g} \quad (-) \quad (5.4.3)$$

5.5 Kolizní síly

Implementace DEM kódu ve Fluentu je založena na takzvaném přístupu měkké koule (soft sphere approach, viz Obr. 9), kdy síly vznikající během kolizí jsou stanoveny pomocí deformací částic, jež je dána jako přesah δ (m) mezi kolidujícími částicemi, nebo mezi částicí a okolní geometrií. Do tohoto modelu mohou být zahrnuty i síly působící na částici v důsledku tření a válivého odporu.



Obr. 9 Přístup měkké koule, převzato a upraveno z [32]

K modelování kolizí byl použit spring-dashpot model se zahrnutím tření a valivého odporu částic, tento model byl rovněž použit v [21] a [25]. Druhý hojně používaný typ modelu kolizních sil zvaný Hertzian, použitý například v pracích [13], [22], [23], přímo pracuje s Youngovým modulem pružnosti a je charakteristický kratšími dobami jednotlivých kolizí částic, čímž se více blíží reálnému stavu, avšak zpravidla vede na nižší časový krok pevné fáze, čímž dochází ke zvýšení časové náročnosti simulace.

K výpočtu kontaktních sil v normálovém směru je nutno zadat konstantu tuhosti k (N/m) a koeficient restituce η (–), jež vyjadřuje poměr mezi konečnou a počáteční rychlostí částice po kolizi. Síla působící na částici je dána následující rovnicí:

$$\vec{F}_1 = (k\delta + \gamma(\vec{v}_{12} \cdot \vec{e}_{12}))\vec{e}_{12} \quad (\text{N}) \quad (5.5.1)$$

Ostatní členy rovnice jsou pak dány vztahy:

$$\vec{e}_{12} = (x_2 - x_1)/\|x_2 - x_1\| \quad (-) \quad (5.5.2)$$

$$\delta = \|x_2 - x_1\| - (r_1 + r_2) \quad (\text{m}) \quad (5.5.3)$$

$$f_{ztrat} = \sqrt{\pi^2 + \ln^2 \eta} \quad (-) \quad (5.5.4)$$

$$m_{12} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (\text{kg}) \quad (5.5.5)$$

$$t_{kolize} = f_{ztrat} \sqrt{\frac{m_{12}}{k}} \quad (\text{s}) \quad (5.5.6)$$

$$\gamma = -2 \frac{m_{12} \ln \eta}{t_{kolize}} \quad (\text{kg/s}) \quad (5.5.7)$$

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 \quad (\text{m/s}) \quad (5.5.8)$$

kde \vec{e}_{12} (–) je jednotkový vektor definován z částice 1 do částice 2 a souřadnice x_1 a x_2 (m) reprezentují pozici částic, přesah δ (m), r_1 a r_2 (m) jsou poloměry částic, f_{ztrat} (–) představuje ztrátový faktor, m_{12} (kg) je redukovaná hmotnost a m_1 a m_2 (kg) jsou hmotnosti částic, t_{kolize} (s) je čas trvání kolize mezi dvěma částicemi, γ (kg/s) představuje koeficient tlumení, \vec{v}_{12} (m/s) je relativní rychlost mezi částicemi a \vec{v}_1 a \vec{v}_2 (m/s) jsou rychlosti částic.

Tření mezi částicemi nebo mezi částicí a stěnou je dáno rovnicí Coulombova zákona tření (5.5.9) a válivý odpor lze určit pomocí rovnice (5.5.10), přičemž obojí přímo závisí na normálové síle F_n (N). K výpočtu je nutno zadat součinitel tření μ (–) a koeficient válivého odporu μ_{vo} (–).

$$F_t = \mu F_n \quad (\text{N}) \quad (5.5.9)$$

$$F_{vo} = \mu_{vo} F_n \quad (\text{N}) \quad (5.5.10)$$

Souhrn všech parametrů, jež je nutno zadat v modelech, je uveden níže v Tab. 5. Z údajů o experimentech uvedených v diplomové práci [26] lze určit pouze hustotu a dynamickou viskozitu. Ostatní parametry je nutné vhodně odhadnout.

Hustota materiálu částice	ρ_p
Průměr částice	d_p
Hustota plynu	ρ_g
Dynamická viskozita plynu	μ_g
Součinitel tření	μ
Součinitel válivého odporu	μ_{vo}
Koeficient restituce	η
Konstanta tuhosti	k

Tab. 5 Seznam vstupních parametrů

5.6 Volba hodnot parametrů DEM modelu kolizí

Pro DEM model kolizí výpočtu kontaktních sil byly na základě rešerše a hodnot zmíněných v Tab. 2 zvoleny hodnoty použité v práci [22], kde byly experimentálně měřeny a následně ověřeny hodnoty parametrů DEM modelu písku během mísení částic v rotačním bubnu, přičemž pro tyto hodnoty byla prokázána rozumná shoda mezi simulací a experimentem. Chybějící hodnoty parametrů, které nebyly v práci [22] uvedeny, byly následně doplněny ze studie [23], kde bylo zkoumáno prohrátí částic asfaltové směsi, čili jak sám autor uvádí, směsi písku a drceného kamene, v rotační sušící peci. Tímto byly získány hodnoty koeficientů restituce, tření a válivého odporu pro kontakty částice-částice a částice-stěna.

Bohužel ani v jednom z těchto dvou případů a ani v ostatních studiích uvedených v kapitole 3.2 nebyla uvedena hodnota konstanty tuhosti pro tento případ, proto nejdříve byla pro základní simulaci zvolena hodnota 400 N/m, přičemž pro zjednodušení byla uvažována totožná hodnota tuhosti jak pro kontakt částice-částice tak i částice-stěna. Později byly použity i jiné hodnoty viz. kapitola 6.3. Souhrn všech převzatých a zvolených hodnot parametrů DEM modelu se nachází v Tab. 6. Pro materiál částic byla rovněž ze studie [22] převzata hustota písku.

Parametr		Hodnota
Hustota materiálu částic ρ_p (kg/m ³)		2 368 [22]
Konstanta tuhosti k (N/m)		400
Koeficient restituce η (-)	částice-částice	0,48 [22]
	částice-stěna	0,41 [22]
Součinitel tření μ (-)	částice-částice	0,57 [22]
	částice-stěna	0,45 [23]
Součinitel válivého odporu μ_{vo} (-)	částice-částice	0,30 [23]
	částice-stěna	0,30 [23]

Tab. 6 Převzaté parametry DEM modelu

K modelování turbulentního proudění byl použit realizovatelný k-ε model turbulence. Tento model byl rovněž použit v práci [23], z níž byla převzata část hodnot parametrů DEM modelu.

5.7 Postup výpočtu

Principem výpočtu je iterativní řešení proudění/pohybu plynné a pevné fáze. Plynná fáze a pevná fáze mají každá svůj vlastní časový krok, přičemž v časovém kroku plynné fáze je počítáno rychlostní pole plynu (tj. určení rychlostí, tlaku, turbulentních veličin) a v časovém kroku pevné fáze jsou určovány trajektorie částic. Částice jsou do systému dávkovány postupně. Samotný výpočet probíhá následujícím způsobem.

Nejprve je vypočítáno pro časový krok plynné fáze rychlostní pole plynu. Následně je do systému nadávkováno předem definované množství částic, jejichž pohyb a trajektorie jsou řešeny dle časového kroku pevné fáze. Následně DEM poskytne informace o poloze a rychlosti částic, dle kterých řešič přepočítá v příštím časovém kroku rychlostní pole plynu a aktualizuje v každé buňce mezifázové koeficienty přenosu hybnosti (vystupující v rovnicích jako zdrojové členy). Na základě mezifázové výměny hybnosti bude DEM v dalším časovém kroku částic po aplikování do systému nové dávky částic počítat trajektorie částic v modifikovaném rychlostním poli. Takto výpočet probíhá pro předem stanovený počet časových kroků.

Velikosti časových kroků byly zvoleny s ohledem na celkovou délku výpočtu a upozornění ve Fluentu. Pro prvotní odhad velikosti DEM časového kroku byl použit vztah (4.6.1) uvedený v [32], jež byl úspěšně použit i v [29], kde m (kg) představuje hmotnost a k (N/m) tuhost částice. Tato rovnice vyjadřuje jednu desetinu doby trvání kolize dvou částic, čímž by mělo být zaručeno, že časový krok bude menší než doba trvání jednotlivých kolizí a tím dojde k zachycení všech probíhajících kolizí částic.

$$\Delta T_{DEM} = \frac{1}{10} 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (\text{s}) \quad (4.6.1)$$

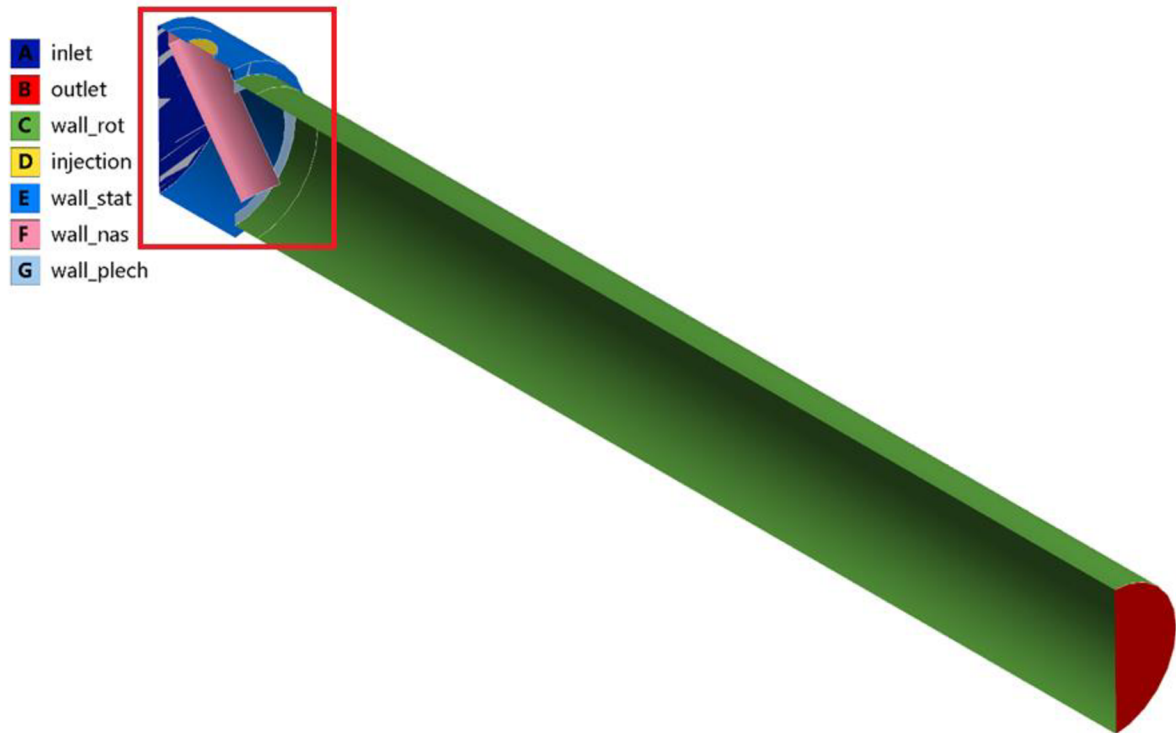
Dle tohoto vzorce maximální použitelný časový krok pro tuhost 400 N/m čítá 0,000 375 s, přičemž časový krok kontinuální fáze může být 10krát až 1000krát větší [23]. Výsledné zvolené časové kroky byly pro DEM 0,000 1 s, pro CFD (kontinuální fázi) 0,005 s.

5.8 Okrajové podmínky

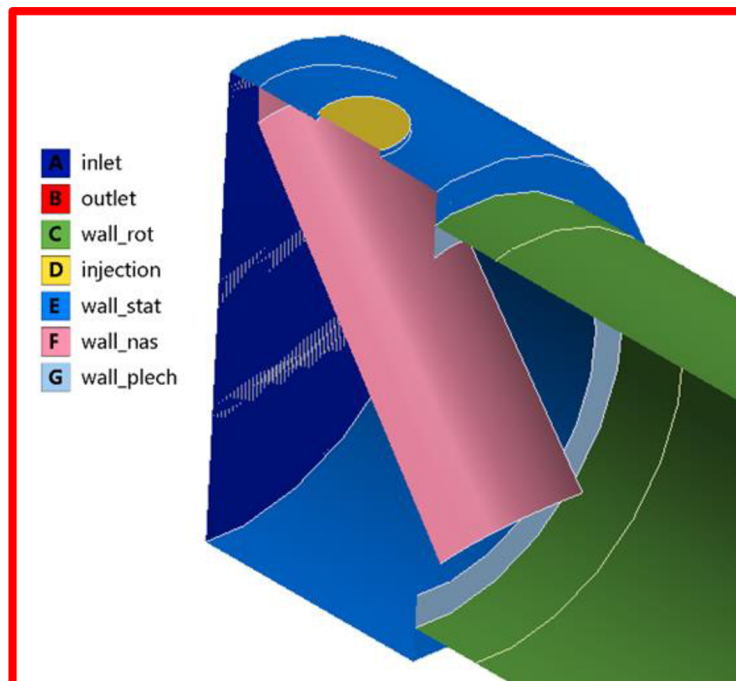
Jednotlivé plochy níže zmíněných okrajových podmínek jsou barevně označeny na Obr. 10 a Obr. 11. Skořepině rotačního válce (plocha *wall_rot*) byla nastavena rotace s rychlostí 0,6388 rad/s kolem podélné osy, což odpovídá výše zmíněné frekvenci otáčení 6,1 ot/min. Na vstupu (plocha *inlet*) byla nastavena vstupní rychlost proudícího vzduchu 5 m/s, což odpovídá hmotnostnímu průtoku 1,6 kg/s.

Dávkování částic do systému probíhá skrze plochu *injection*, na níž byla vytvořena plocha obsahující sedm datových bodů (jedná se o *surface injection*), přičemž každý z bodů určuje vstupní pozici jedné částice. Nové částice vstupují do modelu každý CFD časový krok s nulovou počáteční rychlostí, což přibližně odpovídá způsobu dávkování při experimentu. Toto znamená, že do modelu je každou vteřinu přidáno celkem 1 400 nových částic. Na základě tohoto množství a celkového toku materiálu 0,2 kg/s byl stanoven i průměr částic 4,866 mm,

příčemž podobné velikosti částic byly použity i ve studiích [13] a [21]. Avšak nutno podotknout, že tato hodnota příliš neodpovídá velikosti zrn písku, ale byla zvolena hlavně s ohledem na celkové množství částic nacházející se během simulace v doméně a tím i celkovou kratší dobu výpočtu. Později byla rovněž zvolena velikost částic blíže odpovídající velikosti skutečných zrn písku, o čemž pojednává kapitola 6.4.



Obr. 10 Výsledná použitá geometrie s barevně označenými pojmenovanými výběry (tzv. name selections)



Obr. 11 Detail oblasti vstupní komory

Do simulací byl zahrnut i vliv gravitace, přičemž z důvodu usnadnění pozdějšího vyhodnocování simulace byla samotná geometrie ponechána ve vodorovné poloze a vektor gravitace byl skloněn tak, aby odpovídal výše zmíněnému úhlu sklonu rotačního válce $3,1^\circ$.

Bylo ponecháno výchozí nastavení řešiče a prostorové diskretizace, byl pouze zvýšen řád diskretizace hybnosti (Tab. 7).

Řešič	Phase Coupled SIMPLE
Gradient	Least Square Cell Based
Hybnost	Upwind druhého řádu
Objemová frakce	Upwind prvního řádu
Kinetická turbulentní energie	Upwind prvního řádu
Turbulentní disipace energie	Upwind prvního řádu
Časová diskretizace	Upwind prvního řádu

Tab. 7 Nastavení řešiče

6 Vyhodnocení

K provedení simulací byl použit program Ansys Fluent verze 19.1 [31]. Samotné simulace byly prováděny na ústavním clusteru, přičemž výpočet byl paralelizován na 8 jader a doba výpočtu pro výchozí 100sekundovou simulaci čítala 4 dny. Jelikož se v systému postupně nacházelo stále více a více částic, rychlost výpočtu s rostoucí délkou simulace postupně klesala. Celkový souhrn použitých hodnot všech vstupních parametrů se nachází v Tab. 8. Během výpočtu všechna residua byla menší než 10^{-3} , přičemž jejich pokles byl monotónní a pro konvergenci jednoho časového kroku bylo potřeba většinou 10 až 30 iterací.

Parametr		Hodnota
Časový krok CFD (s)		0,005
Časový krok DEM (s)		0,000 1
Hustota plynu ρ_g (kg/m ³)		1,194
Viskozita plynu μ_g (Pa.s)		1,289 2
Hustota materiálu částic ρ_p (kg/m ³)		2 368
Gravitační zrychlení g (m/s ²)		9,81
Vstupní rychlost proudícího plynu v_g (m/s)		5
Rychlost rotace rotačního válce ω (rad/s)		0,6388
Hmotnostní tok materiálu m (kg/s)		0,2
Průměr částic d_p (mm)		4,866
Konstanta tuhosti k (N/m)		400
Koeficient restituce η (-)	částice-částice	0,48
	částice-stěna	0,41
Součinitel tření μ (-)	částice-částice	0,57
	částice-stěna	0,45
Součinitel válivého odporu μ_{vo} (-)	částice-částice	0,3
	částice-stěna	0,3

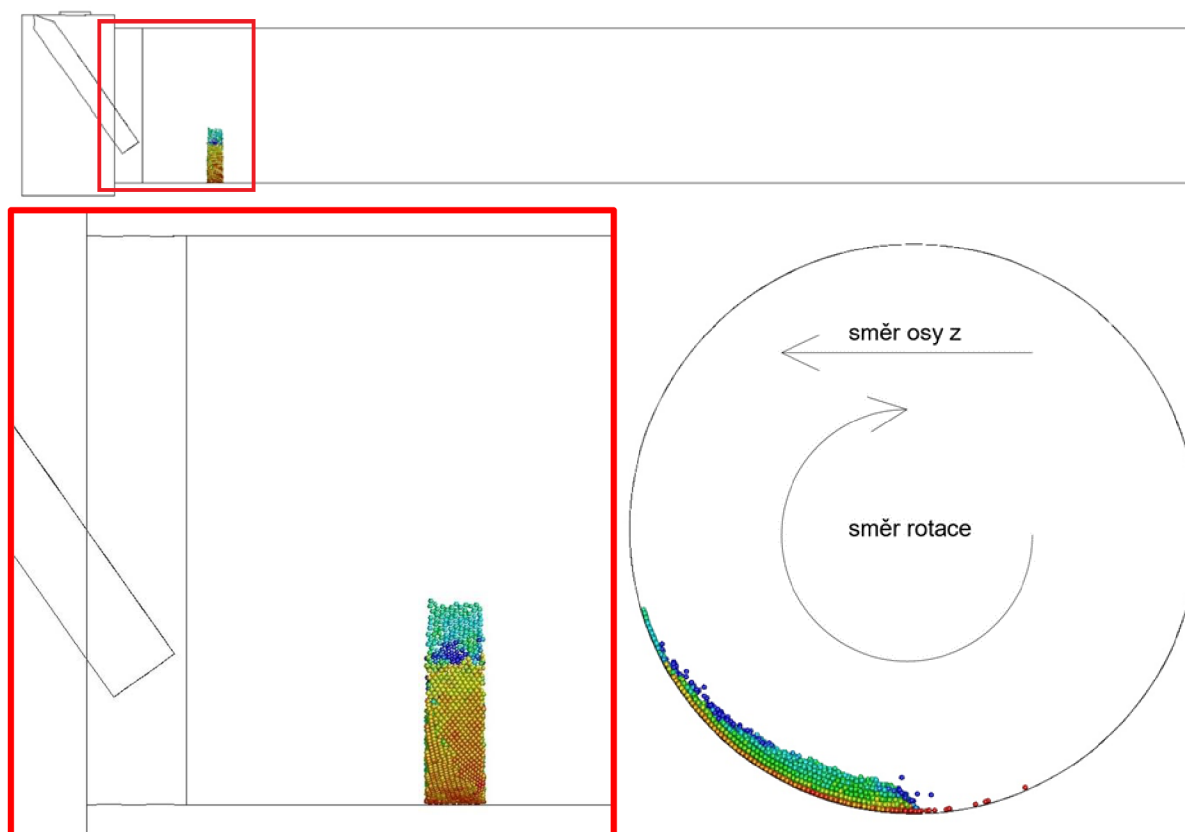
Tab. 8 Parametry výchozí simulace

K dalšímu vyhodnocování je nutno nejprve stanovit sypaný úhel použitého materiálu. Dle odborné literatury [33] sypaný úhel suchého písku dosahuje hodnoty 34° a tato hodnota bude rovněž uvažovaná v této práci.

6.1 Příčný pohyb materiálu

Po zahájení dávkování, částice vlivem gravitace přicházejí do kontaktu s nasypkou, od níž se odrážejí a dopadají do rotačního válce. Zde dochází nejprve ke skákavému pohybu částic a později k jejich usazení a vytvoření lože, jež se postupně posouvá směrem k ústí rotačního válce.

Na Obr. 12 je vyznačeno umístění průřezu v rotačním válci ve vzdálenosti 0,35 m od začátku válcové části pece, v němž je v dalším textu (a Obr. 13) znázorněn a vyhodnocen příčný pohyb částic. Na Obr. 13 lze vidět pomocí série časových okamžiků pohyb materiálu ve zmíněném průřezu zachycený v pětisekundových intervalech, jež přibližně odpovídají půlotáčkám rotačního válce. Částice jsou zbarveny dle rychlosti ve vodorovném směru (ve směru osy z). Jelikož režim příčného pohybu má zásadní vliv na promísení materiálu, níže je ověřeno, zda predikované výsledky korespondují s předpokládaným režimem určeném na základě Froudova čísla.

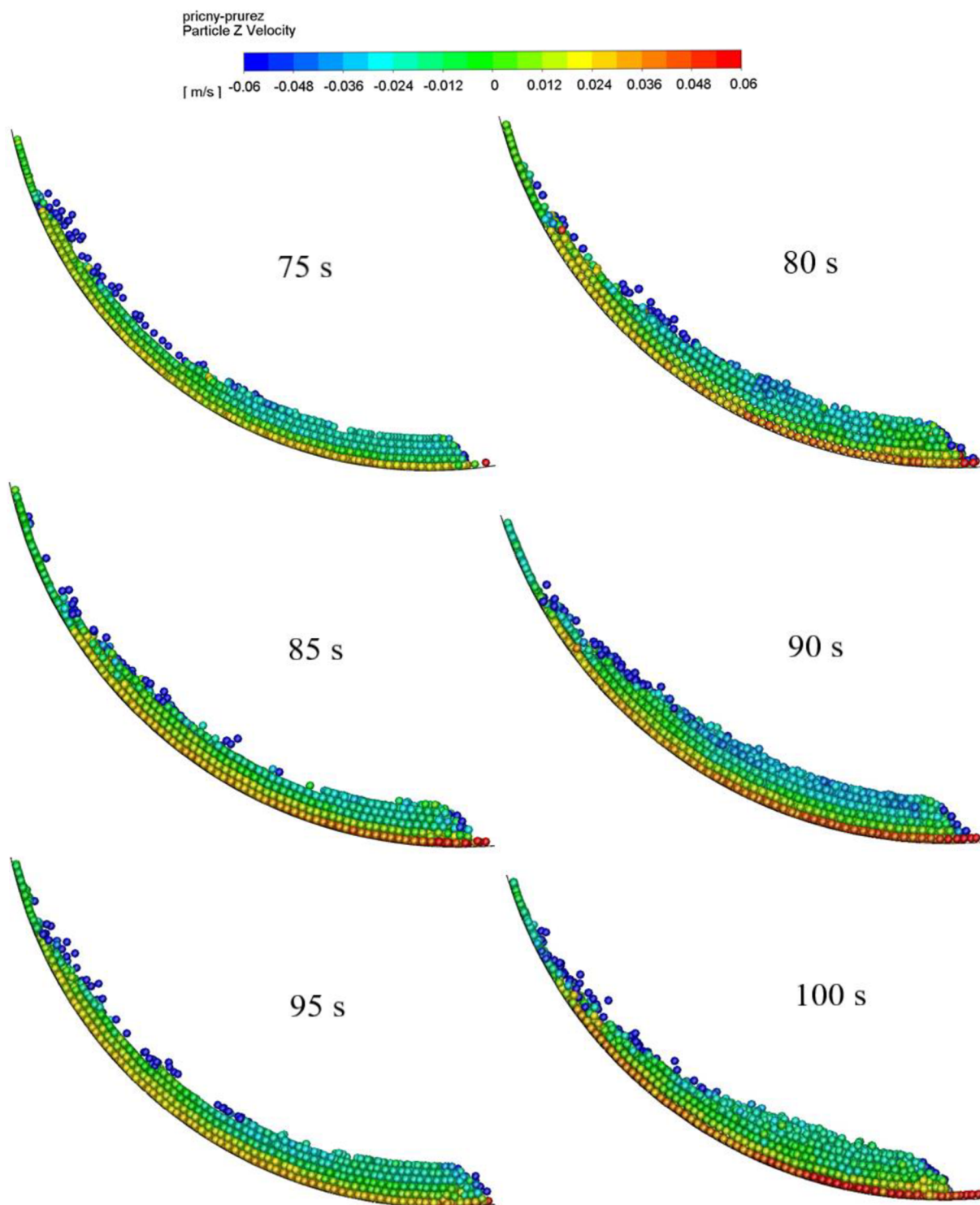


Obr. 12 Zobrazení umístění řezu, použitého pro vyhodnocení na Obr. 13

Jak je z obrázku zřejmé, postupně se mění množství částic, jež můžeme pozorovat v daném průřezu v jednotlivých časových okamžicích. Je patrné, že materiál se pohybuje cyklicky, kdy stoupá podél stěny ve směru rotace a následně padá zpět směrem ke středu rotačního válce. Z toho lze usoudit, že se jedná o válivý režim.

Rovněž lze vidět tenkou vrstvu o tloušťce jedné částice, která po stěně stoupá daleko výše než zbylé částice, z důvodu čehož průřez nemá předpokládaný teoretický tvar, jež lze například

vidět na Obr. 4. Toto obdobné stoupání materiálu po stěně lze pozorovat pro některé kombinace hodnot parametrů DEM modelu i ve studii [21].



Obr. 13 Řezy ložem materiálu ve vzdálenosti 0,35m od začátku rotační válcové části pece

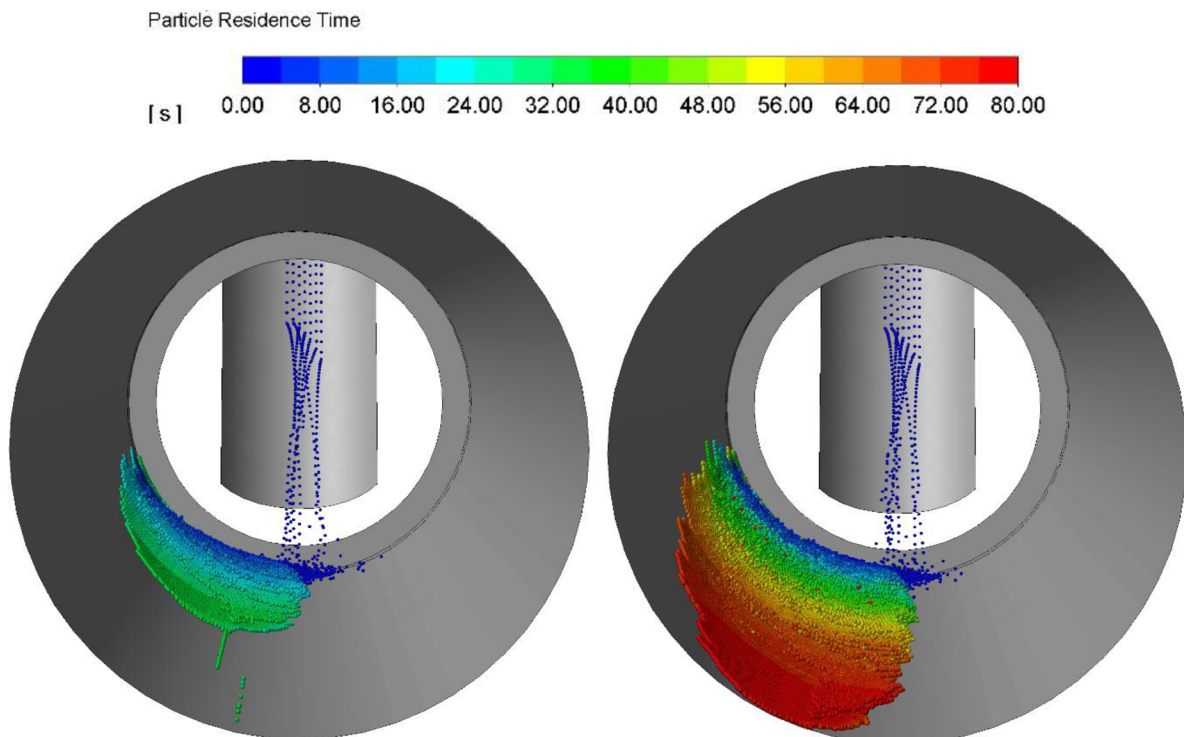
Pro výše uvedené provozní podmínky Froudovo číslo dle vztahu (2.2.1) charakterizující příčný pohyb materiálu dosahuje hodnoty 0,010 4, což dle Tab. 9 převzaté z [6] rovněž odpovídá válivému režimu.

Režim	Froudovo číslo
Klouzání	$Fr < 1.0 \times 10^{-5}$
Sesouvání	$1.0 \times 10^{-5} < Fr < 0.3 \times 10^{-3}$
Valení	$0.5 \times 10^{-3} < Fr < 0.2 \times 10^{-1}$
Kaskádové valení	$0.4 \times 10^{-1} < Fr < 0.8 \times 10^{-1}$
Slapování	$0.9 \times 10^1 < Fr < 1$
Odstředování	$Fr > 1.0$

Tab. 9 Teoretické hodnoty Froudova čísla pro jednotlivé režimy příčného pohybu materiálu, uvedené intervaly platí pro sypný úhel 35°, převzato a upraveno z [6]

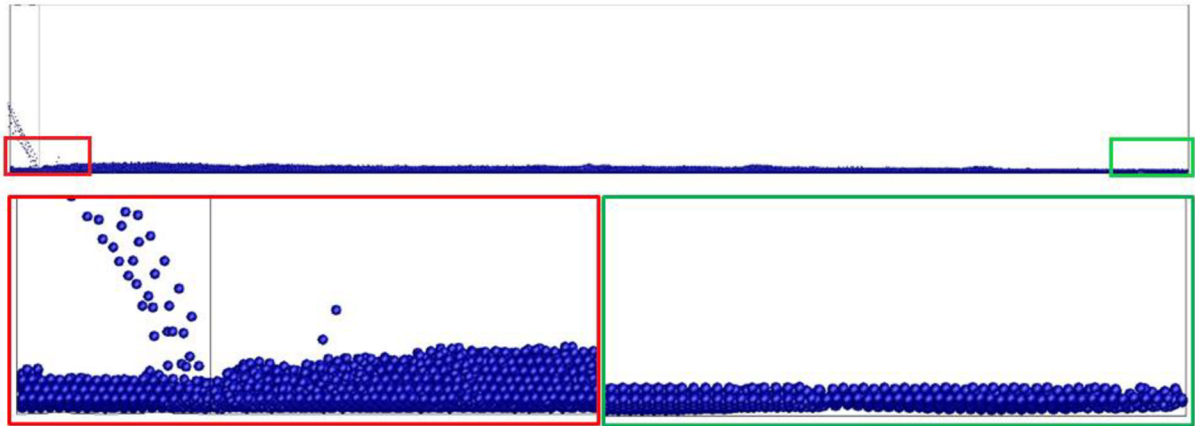
6.2 Zdržná doba

Část z prvotních částic se v úzkém pásu pohybuje výrazně rychleji směrem k ústí rotačního válce než hlavní proud lože, což má za následek to, že první částice opustily rotační válec již po 35 sekundách simulace, avšak hlavní proud částic dorazil k druhému konci válce až po 80 sekundách (Obr. 14).

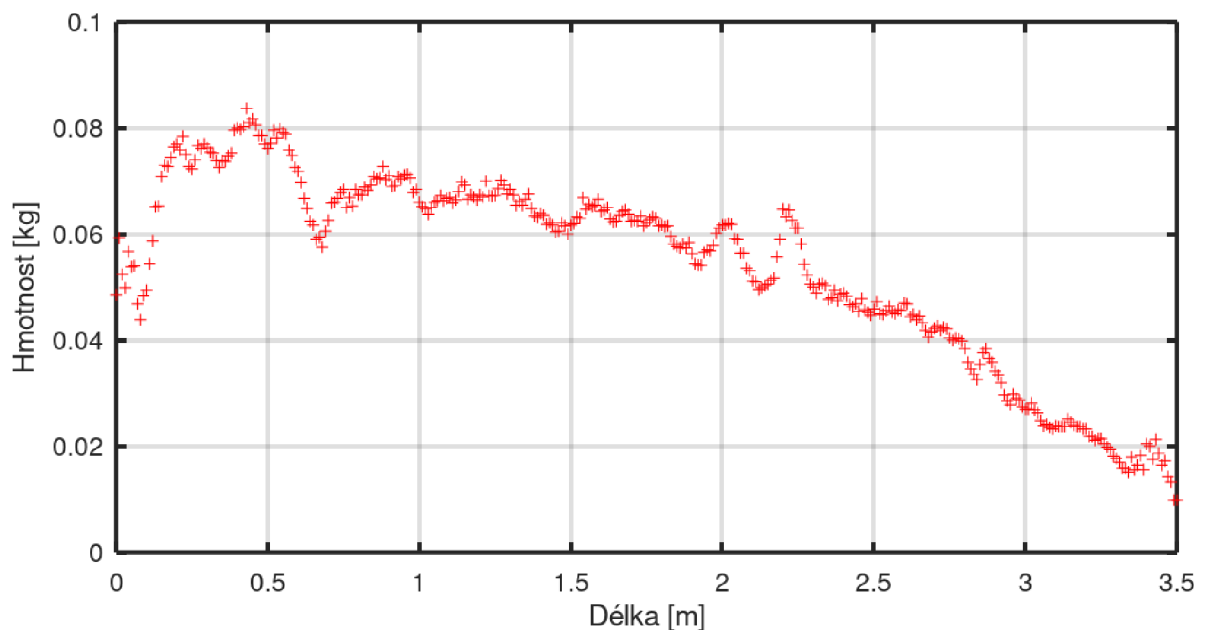


Obr. 14 Pohled na výstupní konec rotačního válce po 35 a 80 sekundách simulace

V této koncové části hlavního proudu se ale nachází podstatně méně částic, než v oblastech blíže násypky, což lze vidět na Obr. 15 a Obr. 16 a i když množství částic opouštějících rotační válec v dalších sekundách postupně roste, tak i po 100 sekundách simulace, kdy se v sušárně nachází celkem 133 030 částic, je výrazně nižší než množství nově dávkovaných částic, což znamená, že ještě nedošlo k ustálení pohybu materiálu v sušárně.

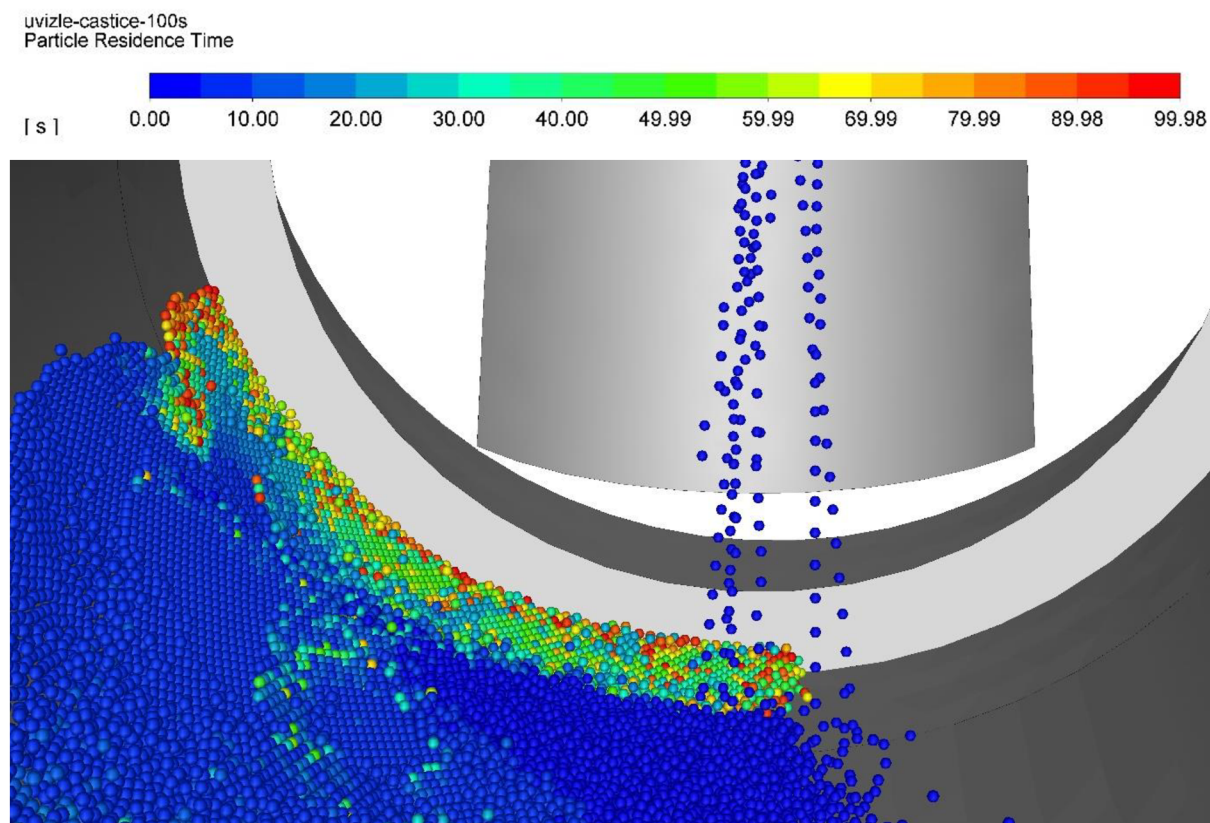


Obr. 15 Tvar lože po délce válce po 100 sekundách simulace



Obr. 16 Množství (distribuce hmoty) částic po délce rotačního válce po 100 sekundách simulace

Zároveň dochází k zajímavému jevu, kdy jak lze vidět na Obr. 17, část částic uvízla v přední části rotačního válce, kde jim v bohybu s hlavním proudem částic směrem k ústí válce brání nové částice padající z násypky. Tyto „uvízlé“ částice, jež představují přibližně 2,1 % všech částic obsažených v sušárně, se pak postupně posouvají vrchní částí lože, avšak jejich zdržná doba je podstatně vyšší než u ostatních okolních částic.



Obr. 17 Uvzlé částice v přední části rotačního válce

V experimentech v odborné literatuře je zdržná doba nejčastěji měřena po dosažení ustáleného stavu na celé délce pece, jež je definován tak, že toky materiálu na vstupu a výstupu sušárny jsou totožné a tím i celkové množství materiálu v zařízení je konstantní. Takto byla zdržná doba měřena například v [7], kde bylo po dosažení ustáleného stavu zařízení odstaveno, změřeno množství materiálu obsaženého v zařízení a následně pomocí vztahu (2.3.1) stanovená střední zdržná doba. Obdobně bylo postupováno i v [34], kde po dosažení ustáleného stavu byly následně do zařízení přidány předem označené částice, u nichž byl pak měřen čas, po který se tyto částice zdržují v zařízení.

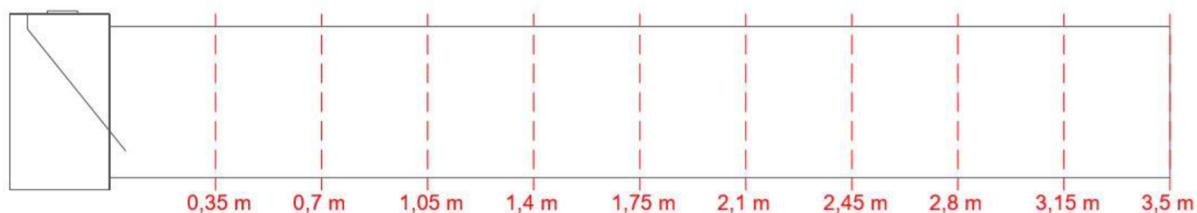
Avšak dosažení ustáleného stavu na celé délce pece by v tomto případě vyžadovalo velice časově náročnou simulaci. Z tohoto důvodu byl zvolen přístup, kdy bude sledováno dosažení ustáleného stavu na kratší délce pece a zjištění rychlosti posuvu a průměrné zdržné doby pro tuto část, na základě čehož bude následně proveden odhad zdržné doby materiálu pro celou délku pece.

6.2.1 Metoda 1

Zdržná doba byla určena dvěma odlišnými způsoby, nejprve na základě vztahu (2.3.1), jež přímo závisí na počtu částic v sušárně. Připomeňme tento vztah:

$$\bar{\tau} = \frac{H}{M} \quad (2.3.1)$$

Pro tento účel byla rotační válcová část sušárny rozdělená do deseti úseků po 0,35 m (Obr. 18), jež mají představovat pec ekvivalentní délky 0,35 m, 0,7 m ... 3,5 m. Na základě aktuální pozice každé z částic bylo určeno celkové množství částic pro danou délku pece a následně byl aplikován vztah (2.3.1), čímž byla získaná průměrná zdržná doba pro danou délku pece.

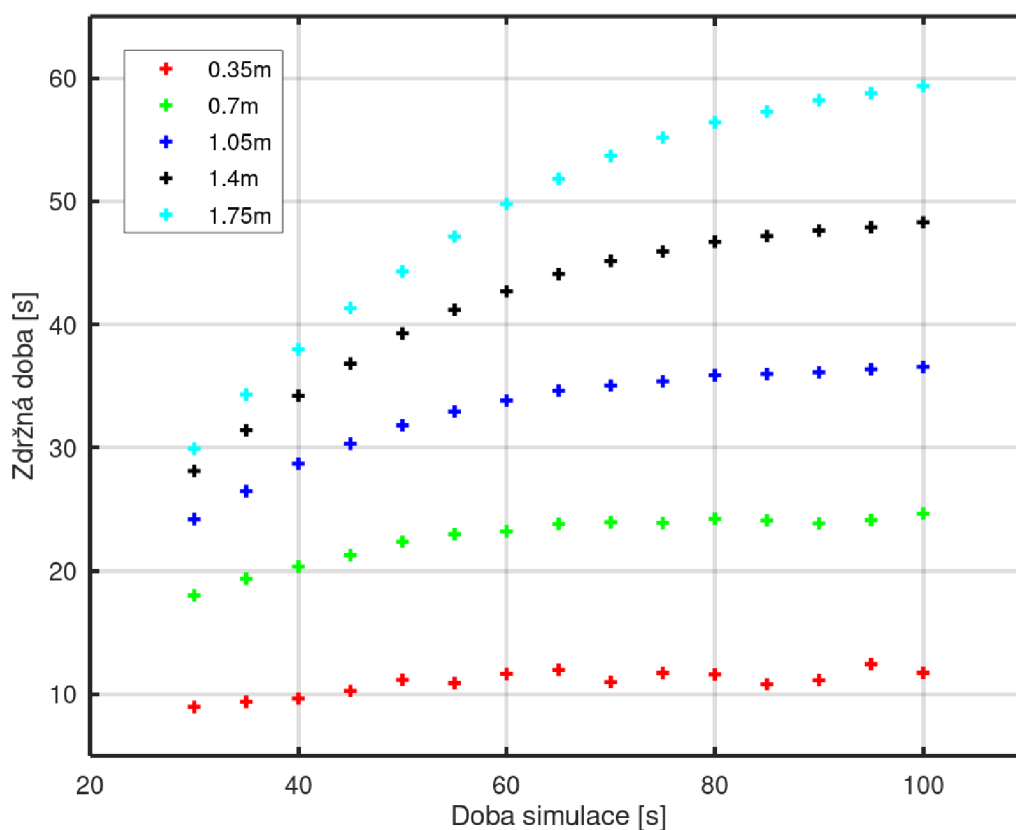


Obr. 18 Rozdělení rotační válcové části

Hodnota průměrné zdržné doby dle tohoto vztahu přímo závisí na celkovém množství částic nacházejících se v daném délkovém úseku rotačního bubnu. Jelikož celkové množství se neustále mění, mění se tím i průměrná zdržná doba, proto byl sledován její vývoj na každém délkovém úseku v časových okamžicích na intervalu od 30 do 100 s, kdy docházelo k jejímu postupnému růstu. Při dostatečně dlouhém časovém intervalu lze očekávat ustálení, hodnoty by se měly asymptoticky blížit k průměrné zdržné době pro daný úsek pece. Tohoto ustálení bylo dosaženo v některých úsecích. Numerické hodnoty průměrných zdržných dob jsou uvedeny v Tab. 10, přičemž pro délky 0,35 až 1,75 m jsou tyto hodnoty viditelné na Obr. 19.

	30	40	50	60	65	70	75	80	85	90	95	100
0,35	9,0	9,6	11,2	11,6	12,0	11,0	11,7	11,6	10,8	11,1	12,4	11,7
0,7	18,0	20,3	22,4	23,2	23,8	23,9	23,9	24,2	24,1	23,9	24,1	24,7
1,05	24,2	26,5	31,8	33,8	34,6	35,0	35,4	35,9	36,0	36,1	36,4	36,6
1,4	28,1	31,4	39,3	42,7	44,1	45,2	45,9	46,7	47,2	47,6	47,9	48,3
1,75	29,9	34,3	44,3	49,8	51,8	53,7	55,2	56,4	57,3	58,2	58,8	59,4
2,1	-	39,9	47,9	54,5	57,5	60,3	62,8	64,6	66,2	67,7	68,8	69,6
2,45	-	-	49,9	57,9	61,6	64,8	68,0	70,9	73,6	75,6	77,3	78,8
2,8	-	-	-	59,9	64,2	68,0	71,7	75,1	78,4	81,5	84,2	86,5
3,15	-	-	-	-	64,9	69,8	74,2	78,1	81,9	85,4	88,7	91,7
3,5	-	-	-	-	-	-	-	79,8	84,2	88,2	91,9	95,0

Tab. 10 Numerické hodnoty průměrné zdržné doby (v sekundách) na jednotlivých délkových úsecích v závislosti na délce simulace



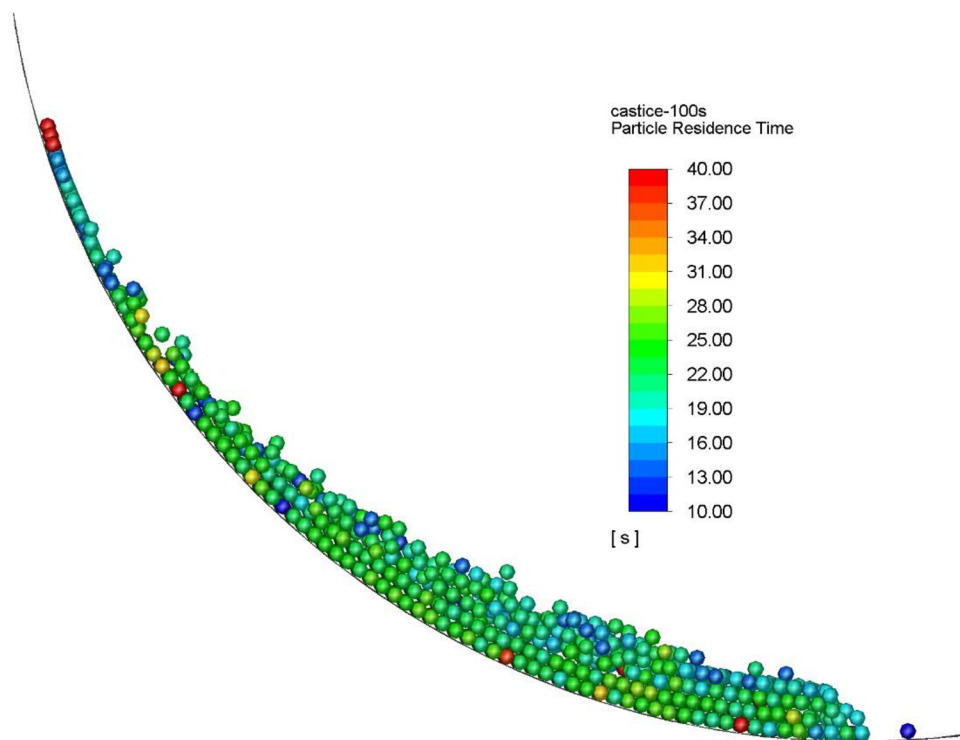
Obr. 19 Část hodnot z Tab. 10 vynesena do grafu

Hodnoty pro vzdálenosti 0,35 m a 0,7 m vykazují ustálený trend, v němž fluktuují okolo určité průměrné hodnoty. Proto tyto průměrné zdržné doby byly použity k určení celkové zdržné doby pro celou rotační válcovou část pece. Průměrná zdržná doba pro délku 0,35 m čítá 11,5 s a pro 0,7 m pak 24,1 s. Toto by znamenalo, že prvních 0,35 m, kdy pohyb částic je ovlivněn skákavým pohybem z násypky, částice v průměru urazily za 11,5 s a dalších 0,35 m kdy dochází již k volnému pohybu materiálu za 12,6 s. Za předpokladu, že v dalších úsecích již dochází k posuvu materiálu konstantní rychlostí jako v úseku 0,35 až 0,7 m, je průměrnou zdržnou dobu pro celou pec možno přibližně určit jako:

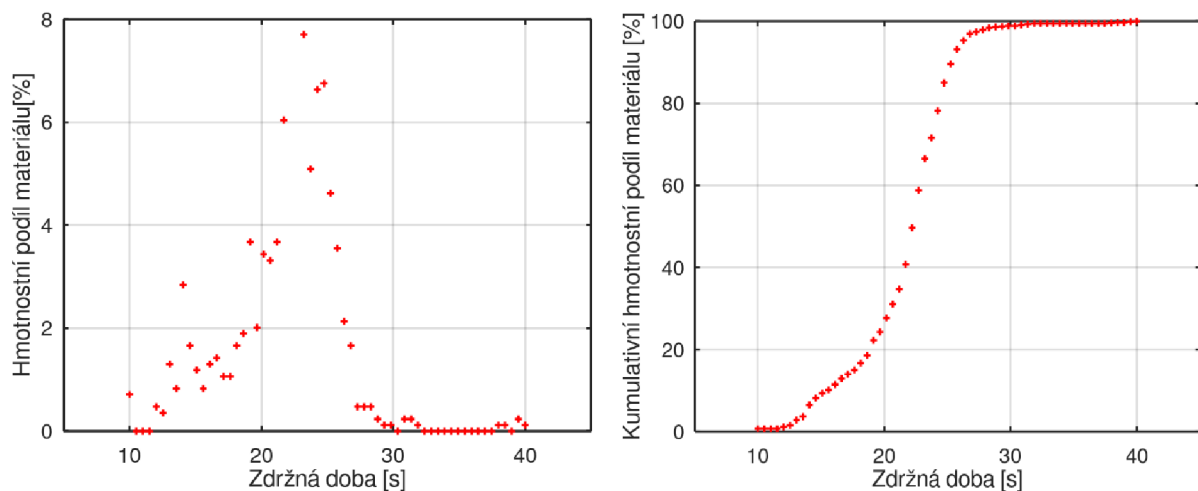
$$\bar{\tau} \cong 11,5 + 9 \cdot 12,6 = 125 \text{ s}$$

6.2.2 Metoda 2

Jelikož každá simulovaná částice si s sebou zároveň nese i údaj o tom, jak dlouho se nachází v systému, lze zdržnou dobu určit i pomocí aktuální hodnoty tohoto času. Jak lze vidět dále v textu na Obr. 20, jež představuje řez ve vzdálenosti 0,69-0,7 m od začátku rotačního válce, v důsledku mísení a různých mechanismů pohybu se v daném průřezu nacházejí částice s různou zdržnou dobou, přičemž četnost jednotlivých zdržných dob v tomto řezu rozdělených do půlsekundových intervalů lze vidět na Obr. 21. K vyhodnocení zdržné doby budou dále brány v úvahu pouze průměrné hodnoty ze všech zdržných dob jednotlivých částic obsažených v daném řezu, přičemž řezy byly provedeny vždy po 10 mm délky rotačního válce, tedy celkem jich bylo uskutečněno 350. Množství částic v jednotlivých řezech lze vidět na Obr. 16.

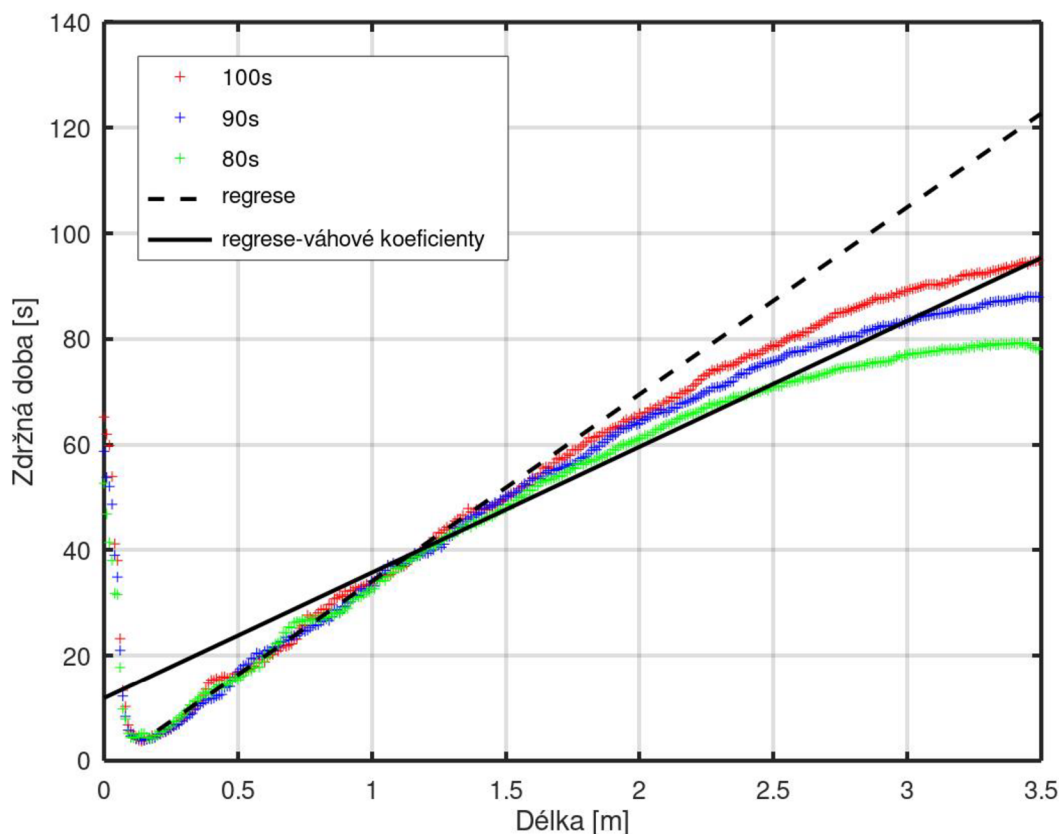


Obr. 20 Řez částicemi ve vzdálenosti 0,7 m po 100 sekundách simulace, částice zbarveny dle zdržné doby



Obr. 21 Zobrazení rozdělení zdržné doby částic a jejich kumulativní četnost

Vývoj průměrné zdržné doby v závislosti na délce pece lze pak vidět na Obr. 22, kde jsou vykresleny průměrné zdržné doby materiálu po délce pece po 80, 90, 100 sekundách simulace. V počáteční oblasti délky pece je jasně patrný vliv uvízlých částic a jejich výrazně vyšší průměrná zdržná doba oproti zbylým částicím, jež ale postupně po délce klesá, přičemž minima je dosaženo okolo 0,14 m délky válce. Za ním lze opět vidět postupný nárůst průměrné zdržné doby, jež se nejprve jeví jako lineární, ale posléze dochází k postupnému poklesu růstu, jehož rychlost se odvíjí od délky simulace.



Obr. 22 Průměrná zdržná doba částic po délce

Lineární chování lze předpokládat po celé délce pece, proto v oblasti, jež je přibližně lineární pro všechny tři délky simulace (0,14-1,2 m), byla provedena lineární regrese metodou nejmenších čtverců. Tímto byla získána rovnice regresní přímky (6.2.2.1) udávající odhad průměrné zdržné doby částic v závislosti na délce x (m) rotačního válce sušárny s intervalem spolehlivost 95 % a koeficientem determinace 0,991. Dle této rovnice průměrná zdržná doba pro celou délku rotačního válce 3,5 m čítá $\bar{\tau} = 122,7 (\pm 2,7)$ (s).

$$\bar{\tau} = 35,452 (\pm 0,6395) \cdot x - 1,370 (\pm 0,474) \quad (\text{s}) \quad (6.2.2.1)$$

Rovnice (6.2.2.1) samozřejmě nezohledňuje vliv uvízlých částic v přední části rotačního válce, v níž je průměrná zdržná doba částic vyšší, proto pro porovnání byla provedena regrese se zohledněním této oblasti, avšak aby rovněž bylo vzato v potaz menší množství částic nacházejících se v této oblasti, byly použity váhové koeficienty, jež představovaly hmotnostní podíly materiálu v jednotlivých řezech. Takto byla získána rovnice regresní přímky (6.2.2.2) s intervalem spolehlivost 95 % a koeficientem determinace 0,477, zohledňující i vliv uvízlých částic. Dle této rovnice průměrná zdržná doba pro celou délku rotačního válce 3,5 m se zahrnutím oblasti uvízlých částic čítá $\bar{\tau} = 95,4 (\pm 20,3)$ (s).

$$\bar{\tau} = 25,289 (\pm 4,829) \cdot x + 6,841 (\pm 3,352) \quad (\text{s}) \quad (6.2.2.2)$$

Je patrné, že pokud u metody 2 nebude brána v úvahu oblast uvízlých částic, tak obě metody (1 a 2) dávají totožné výsledky, přičemž první postup bere v úvahu i uvízlé částice. Samotná podobnost těchto výsledků může být dána faktem, že v obou případech je zdržná doba

vyhodnocována na základě veličin (množství částic v daném délkovém úseku a průměrná zdržná doba v jednotlivých řezech) přímo závislých na provozních podmínkách pece (úhel sklonu, rychlost rotace). Bude-li však do metody 2 zahrnuta i oblast uvízlých částic a oba postupy pak budou pracovat s totožným množstvím částic, dochází k rozdílu v odhadované zdržné době. Regresní model dle metody 2 se zahrnutím uvízlých částic však velmi špatně popisuje variabilitu zdržné doby a není tudíž pro její odhad použitelný.

6.2.3 Porovnání s hypotézami zdržné doby

K výpočtu zdržné doby byly aplikovány i vztahy (tzv. hypotézy) uvedené v kapitole 2.3. Hodnoty použité k výpočtu jsou uvedeny níže v Tab. 11.

Délka rotačního válce L (m)	3,5
Průměr rotačního válce D (m)	0,502
Frekvence otáčení rotačního válce N (ot/min)	6,1
Úhel sklonu rotačního válce θ (°)	3,1
Dynamický sypný úhel materiálu n (°)	34
Objemový průtok sušeného materiálu V (m ³ /min)	5,068e-03

Tab. 11 Hodnoty použité k výpočtu zdržné doby dle hypotéz

Jak lze vidět z Tab. 12, jednotlivé vztahy dávají poměrně odlišné výsledky. Z porovnání s provedenou simulací a zdržnou dobou stanovenou pomocí metody 1 lze vidět, že simulace vykazuje dobrou shodu s rovnicemi (vztahy) (2.3.2) a (2.3.4), přičemž simulace v prvním případě predikuje zdržnou dobu přibližně o 2 % delší a v druhém o necelých 5 % kratší. Naopak v případě vztahu (2.3.3) ke shodě nedochází, jelikož tento vztah predikuje výrazně delší zdržnou dobu i oproti ostatním zmíněným rovnicím, avšak v [7] tento vztah vykazoval výrazně lepší shodu s prováděným praktickým měřením, než rovnice (2.3.4).

Nutno podotknout, že zdržná doba materiálu pro totožné provozní podmínky v experimentu v [26] čítala 4,25 min, čili byla více než dvojnásobná, avšak v tomto experimentu rotační válcová část zařízení byla opatřena lopatkovou vestavbou, jejíž použití má za následek nárůst zdržné doby.

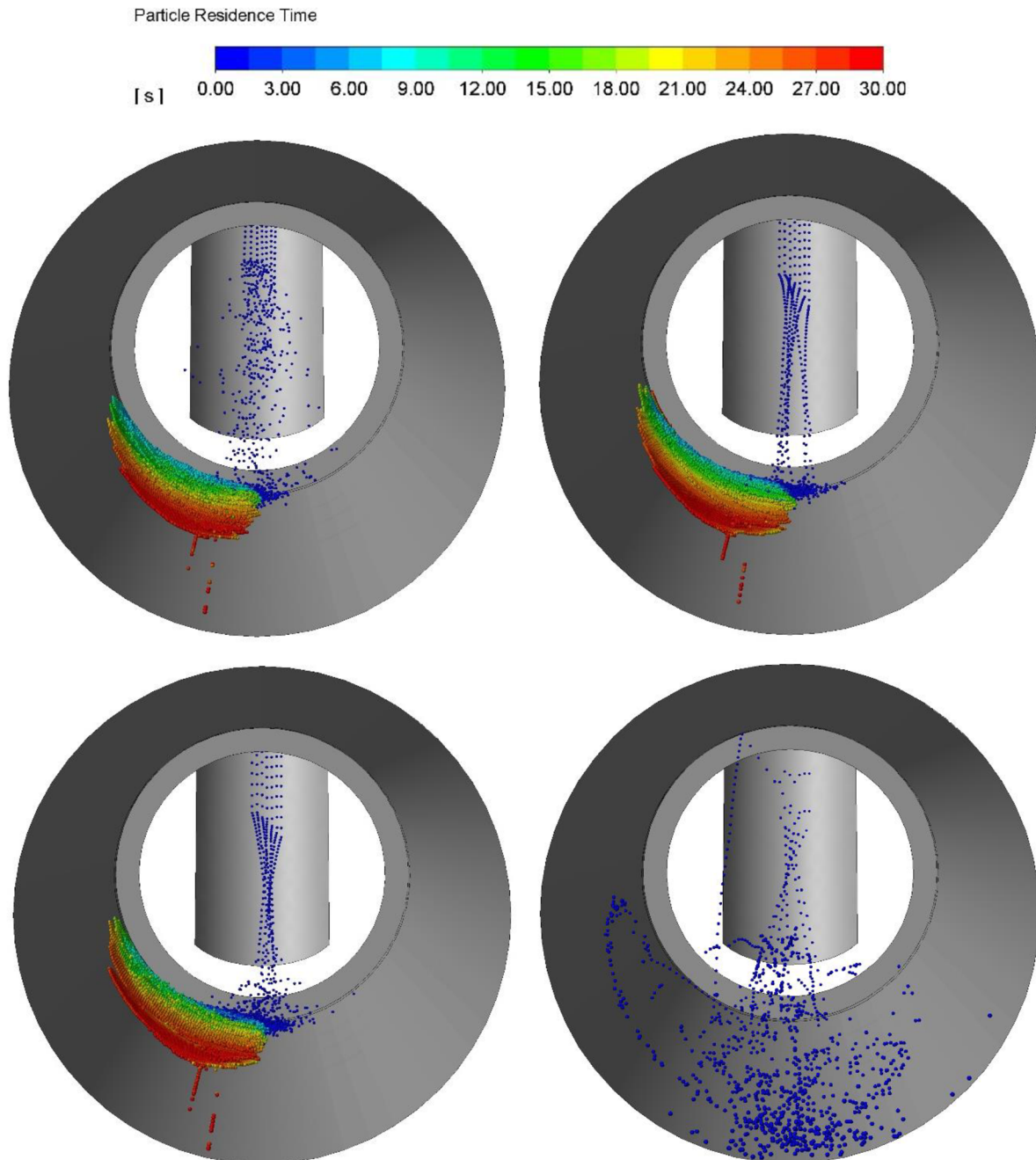
Vztah	(2.3.2)	(2.3.3)	(2.3.4)
Zdržná doba (s)	122,4	228,3	131,1
Rozdíl oproti simulaci (s)	-2,6	+103,3	+6,1
Rozdíl (%)	-2,1	+82,6	+4,9

Tab. 12 Zdržná doba dle různých vztahů

6.3 Vliv konstanty tuhosti

Jelikož údaje z rešerše ohledně konstanty tuhosti byly nedostačující, byly dále zvoleny různé hodnoty této konstanty a sledován jejich vliv na zdržnou dobu. Výchozí simulace počítala s hodnotou 400 N/m. Pro další výpočty byly zvoleny hodnoty 100 N/m, 700 N/m (tedy hodnoty lišící se od výchozí o ± 75 %) a rovněž hodnota řádově větší 10 000 N/m. Ostatní parametry zůstaly nezměněny. Na Obr. 23 lze vidět stav jednotlivých simulací po 30 sekundách. Na první

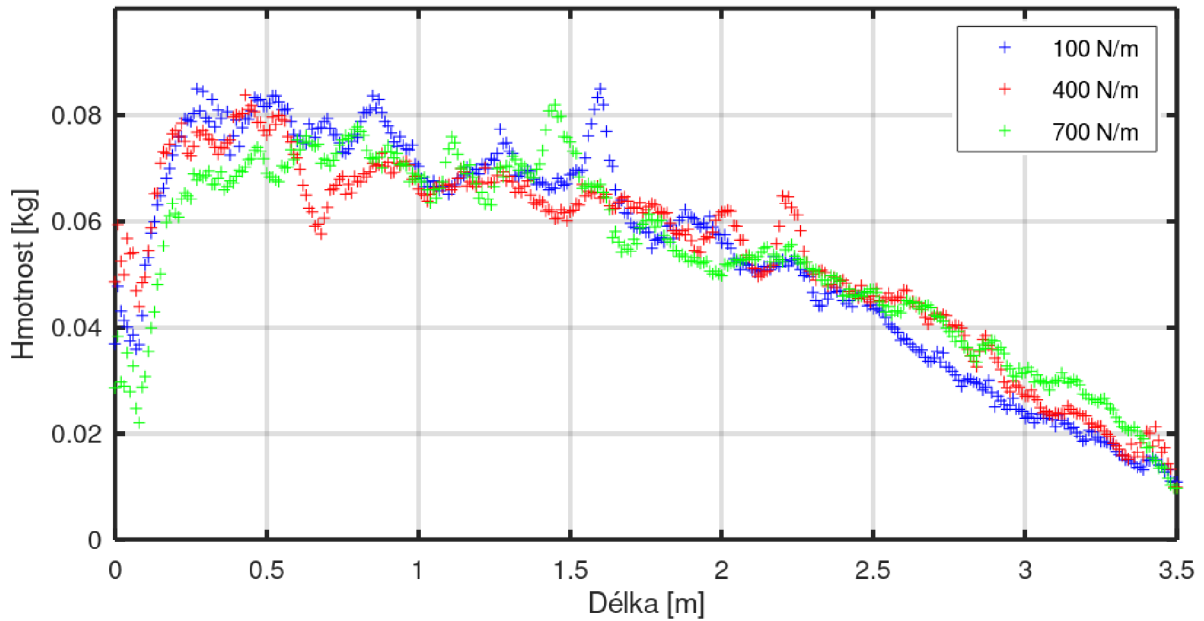
pohled obrázky pro tuhosti 100, 400 a 700 N/m vypadají obdobně, avšak obrázek pro tuhost 10 000 N/m je výrazně odlišný, kdy částice opouštějí rotační část pece v podstatně kratším čase a zdržná doba částic dosahuje pouze přibližně jedné sekundy, což má za následek, že nedošlo k vytvoření masivního lože materiálu. Z tohoto důvodu bylo dále pokračováno pouze ve výpočtu pro tuhosti 100 a 700 N/m, pro něž byla provedena 100sekundová simulace.



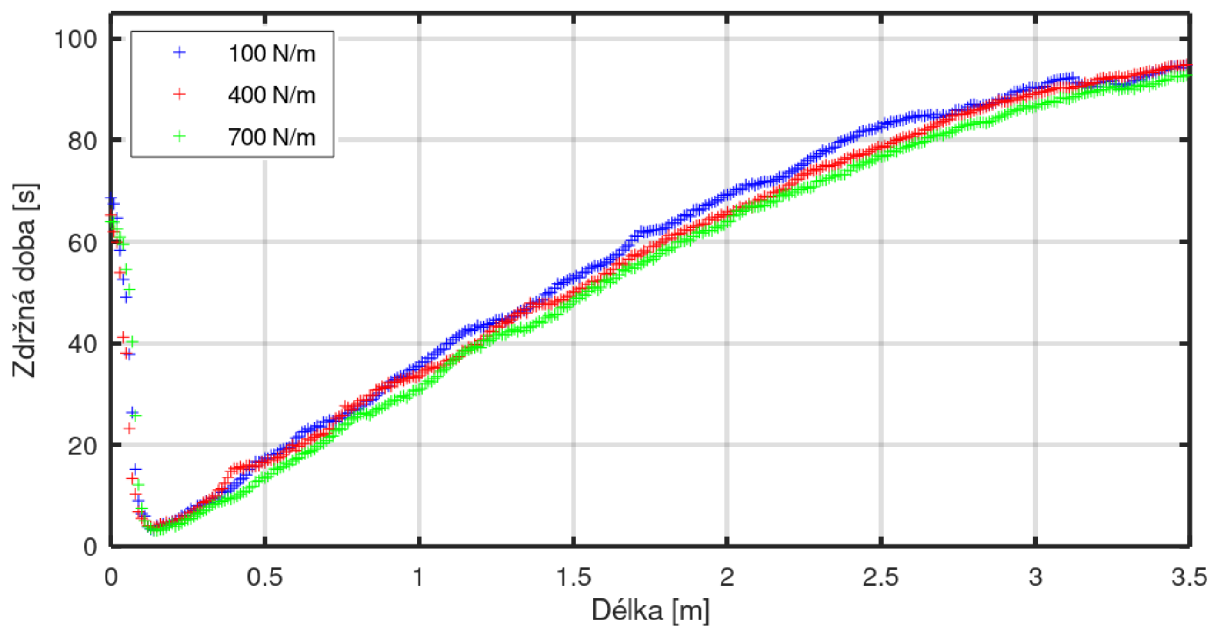
Obr. 23 Vizuelní porovnání stavu po 30 sekundách s různými konstantami tuhosti (N/m): 100 (vlevo nahoře), 400 (vpravo nahoře), 700 (vlevo dole), 10 000 (vpravo dole)

K vyhodnocení zdržných dob pro hodnoty konstanty tuhosti 100 N/m a 700 N/m byl použit totožný postup jako pro hodnotu 400 N/m popsany v kapitole 6.2. Na Obr. 24 lze vidět vývoj množství částic po délce pece po 100 sekundách výpočtu, kde jsou patrná různá množství materiálu v přední části bubnu v okolí násypky a Obr. 25 ilustruje vývoj průměrné zdržné doby

po délce rotačního válce sušárny, přičemž na první pohled se zdá být patrný trend, že s poklesem konstanty tuhosti dochází k růstu zdržné doby.



Obr. 24 Vývoj množství materiálu po délce bubnu pro různé konstanty tuhosti



Obr. 25 Vývoj průměrné zdržné doby po délce bubnu pro různé konstanty tuhosti

Pro konstantu tuhosti 100 N/m:

Výsledná zdržná doba určená pomocí metody 1:

$$\bar{\tau} \cong 11,6 + 9 \cdot 14,0 = 137,6 \text{ s}$$

Regrese v lineární oblasti nezahnující vliv uvízlých částic, koeficient determinace 0,997:

$$\bar{\tau} = 38,723 (\pm 0,390) \cdot x - 2,875 (\pm 0,285) \quad (s) \quad (6.3.1)$$

$$\bar{\tau} = 132,7 (\pm 1,65) \quad (s)$$

Regrese s váhovými koeficienty zahrnující i vliv uvízlých částic, koeficient determinace 0,497:

$$\bar{\tau} = 28,201 (\pm 5,173) \cdot x + 5,592 (\pm 3,629) \quad (s) \quad (6.3.2)$$

$$\bar{\tau} = 104,3 (\pm 21,7) \quad (s)$$

Pro konstantu tuhosti 700 N/m:

Výsledná zdržná doba určená pomocí metody 1:

$$\bar{\tau} \cong 9,1 + 9 \cdot 13,0 = 126,1 \text{ s}$$

Regrese v lineární oblasti nezahnující vliv uvízlých částic, koeficient determinace 0,997:

$$\bar{\tau} = 35,767 (\pm 0,409) \cdot x - 3,892 (\pm 0,305) \quad (s) \quad (6.3.3)$$

$$\bar{\tau} = 121,3 (\pm 1,74) \quad (s)$$

Regrese s váhovými koeficienty zahrnující i vliv uvízlých částic, koeficient determinace 0,493:

$$\bar{\tau} = 25,094 (\pm 5,244) \cdot x + 4,878 (\pm 3,794) \quad (s) \quad (6.3.4)$$

$$\bar{\tau} = 92,7 (\pm 23,23) \quad (s)$$

Ze souhrného pohledu na výsledky zaznamenané v Tab. 13 je patrné, že snížením hodnoty konstanty tuhosti o 75 % došlo k růstu průměrné zdržné doby dle metody 1 o 10 %, avšak při zvýšení hodnoty této konstanty o 75 % prakticky nedošlo skoro k žádné změně zdržné doby.

Konstanta tuhosti (N/m)	100	400	700
Podíl uvízlých částic %	1,89	2,11	1,10
Metoda 1 (s)	137,6	125	126,1
Metoda 2 (s)	132,7 ($\pm 1,65$)	122,7 ($\pm 2,7$)	121,3 ($\pm 1,7$)
Metoda 2 váhové koeficienty (s)	104,3 ($\pm 21,7$)	95,4 ($\pm 20,3$)	92,7 ($\pm 23,2$)

Tab. 13 Porovnání vlivu velikosti konstanty tuhosti

Rovněž lze vidět drobný rozkol mezi zdržnou dobou určenou jednotlivými metodami, kdy metoda 2 (jak se zahrnutím oblasti uvízlých částic, tak i bez ní) pro tuhost 700 N/m predikuje nepatrně kratší zdržnou dobu než pro tuhost 400 N/m, kdežto v případě metody 1 je tomu přesně naopak. Tento rozdíl může být dán faktem, že množství částic v úseku do 0,35 m, jak lze vidět na Obr. 24, je pro tuhost 700 N/m nižší a tím je kratší i průměrná zdržná doba v tomto úseku (Tab. 14). V dalším úseku do 0,7 m již došlo k snížení rozdílu v množství částic pro konstanty 400 a 700 N/m a tím i v průměrné zdržné době. Průměrná zdržná doba je dále

odhadována na základě rozdílu zdržných dob pro úseky 0,35 a 0,7 m, a tento rozdíl již vychází vyšší pro tuhost 700 N/m a vzhledem k tomu, že k odhadu pro celou délku pece je tento rozdíl brán celkem 9krát, ve výsledku metoda 1 takto predikuje nepatrně vyšší zdržnou dobu pro tuhost 700 N/m, než 400 N/m, i když samotná zdržná doba pro úsek 0,7 m je dle vztahu (2.3.1), nižší pro tuhost 700 N/m než 400 N/m.

Úsek	100 N/m	400 N/m	700 N/m
0,35 m (s)	11,6	11,5	9,1
0,7 m (s)	25,6	24,1	22,1
rozdíl (s)	14,0	12,6	13,0

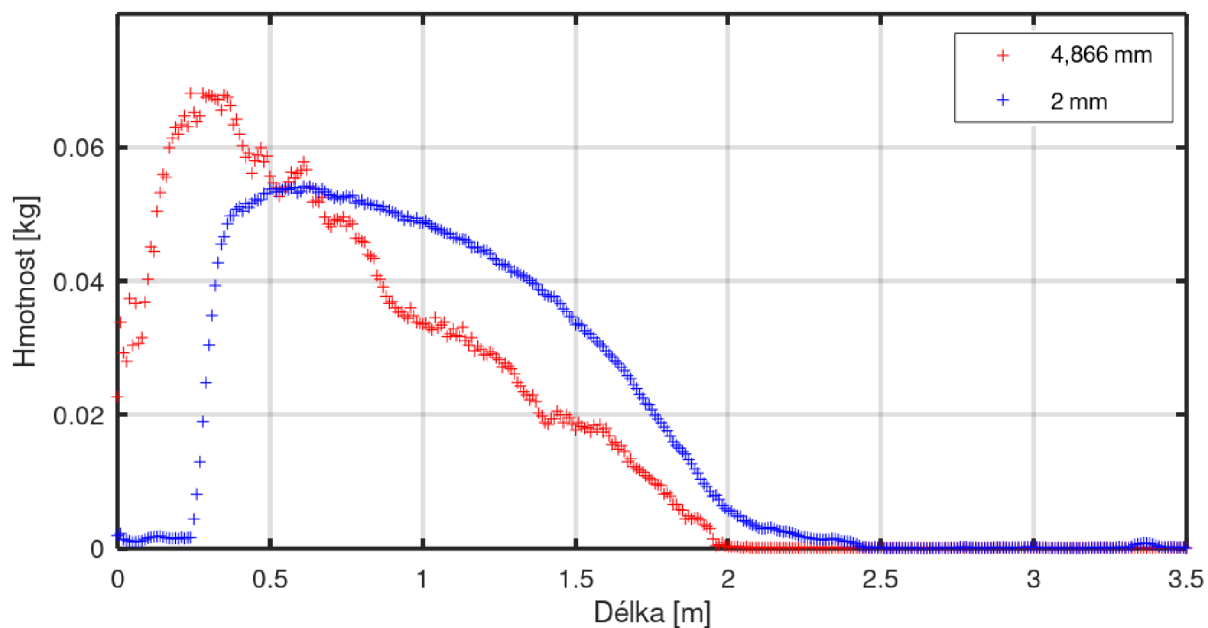
Tab. 14 Numerické hodnoty zdržné doby materiálu stanovené dle metody 1

6.4 Vliv velikosti částic

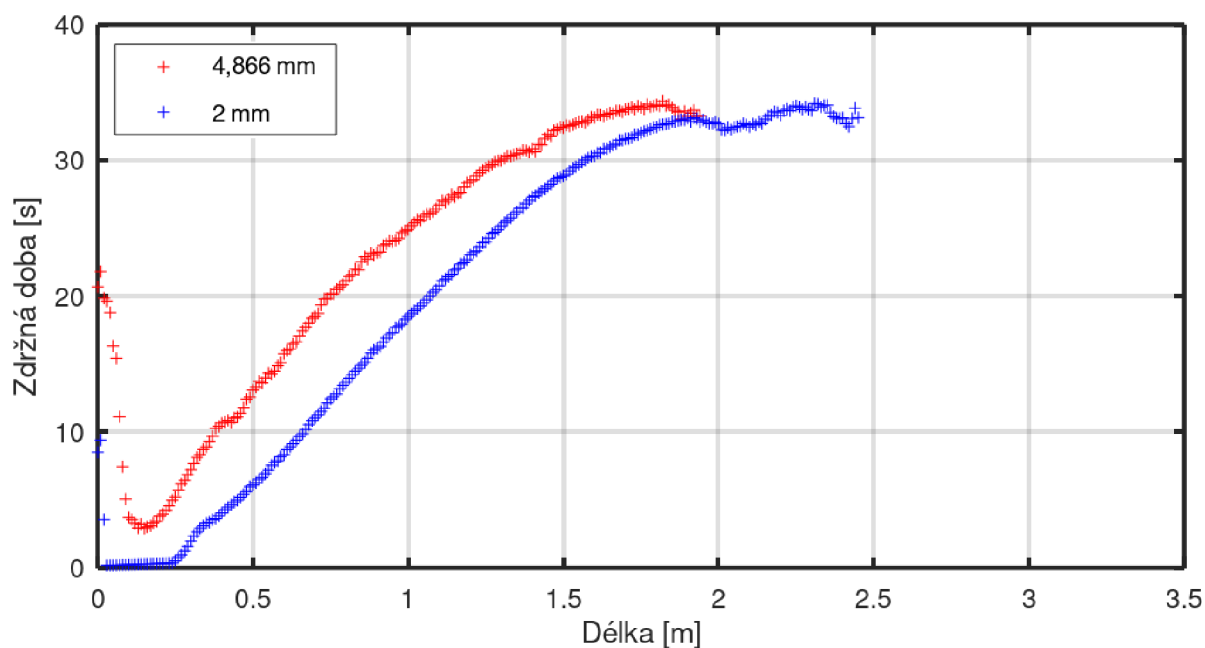
Dosud byla velikost částic zvolena s ohledem na celkovou dobu výpočtu, ale jelikož částice velikosti 4,866 mm příliš neodpovídají zrnům písku, jejichž velikost se typicky pohybuje od 0,63 až 2 mm, byla nyní pro další simulaci a lepší přiblížení skutečnému písku zvolena velikost průměru kulových částic reprezentující hrubozrný písek 2 mm. Použitá síť i nastavení bylo totožné jako ve výchozí simulaci (Tab. 8), byla pouze pozměněna velikost částic. Při zachování stejného hmotnostního toku materiálu tímto došlo k více než čtrnáctinásobnému nárůstu počtu částic v doméně a tím i k nárůstu celkové doby výpočtu, z důvodu čehož byla uskutečněna pouze 35sekundová simulace, jež celkem probíhala 8 dnů.

Tato simulace byla porovnávána se stavem výchozí simulace (částice velikosti 4,866 mm) po 35 s (obě simulace se lišily pouze velikosti částic). V prvním případě pro průměr 4,866 mm se po 35 sekundách v doméně nacházelo 49 000 částic, kdežto v druhém případě pro průměr 2 mm se v doméně nacházelo již 705 000 částic. Opět byla celá doména rozdělena na 350 řezů širokých 10 mm, z nichž byly brány průměrné hodnoty množství částic a jejich zdržné doby.

Na Obr. 26 lze vidět hmotnost částic obsažených v jednotlivých řezech. Je patrné, že v případě menších částic takřka nedošlo k vytvoření oblasti uvízlých částic, kdy částice obsažené v této oblasti představovaly pouze 0,08 % všech částic v doméně, kdežto v případě větších částic se jedná o více než 2 %. Z toho je možno usoudit, že samotné uvažování vlivu uvízlých částic na zdržnou dobu není nutné, kdy s reálnější hodnotou velikosti částice prakticky nedochází k jejich vzniku. Rovněž lze vidět, že v případě menších částic dochází k vytvoření masivního lože ve větší vzdálenosti od násypky a samotné rozložení materiálu se zdá být rovnoměrnější a hladší. Zároveň došlo i ke všeobecnému posunutí lože směrem k ústí válce kdy střední délková souřadnice částic čítá 0,96 m, kdežto v případě větších částic je to 0,64 m. Toto mělo za následek i zkrácení průměrné zdržné doby částic v daném délkovém úseku rotačního válce, jak lze vidět na Obr. 27.

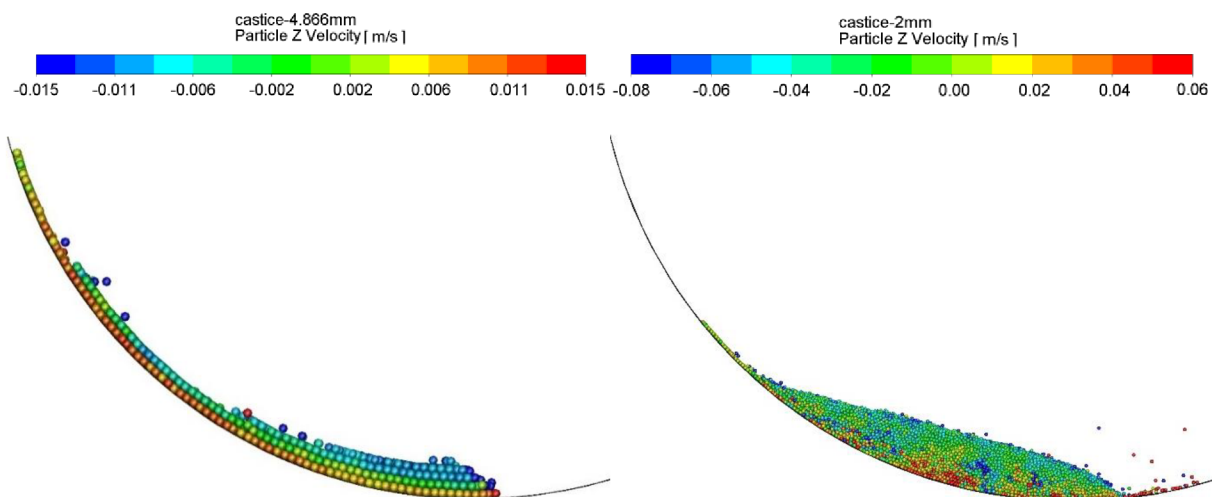


Obr. 26 Množství částic v závislosti na pozici pro dvě různé velikosti částic



Obr. 27 Vývoj průměrné zdržné doby v závislosti na pozici částic v rotačním válci pro dvě různé velikosti částic

Rovněž jak je patrné z Obr. 28, na němž jsou zobrazeny průřezy lože ve vzdálenosti 0,7 m od začátku rotačního válce pece, došlo ke změně samotného tvaru lože, kdy pro menší částice velikosti 2 mm je vyšší, více sevřené a všeobecně vizuálně více odpovídá předpokládanému teoretickému tvaru.

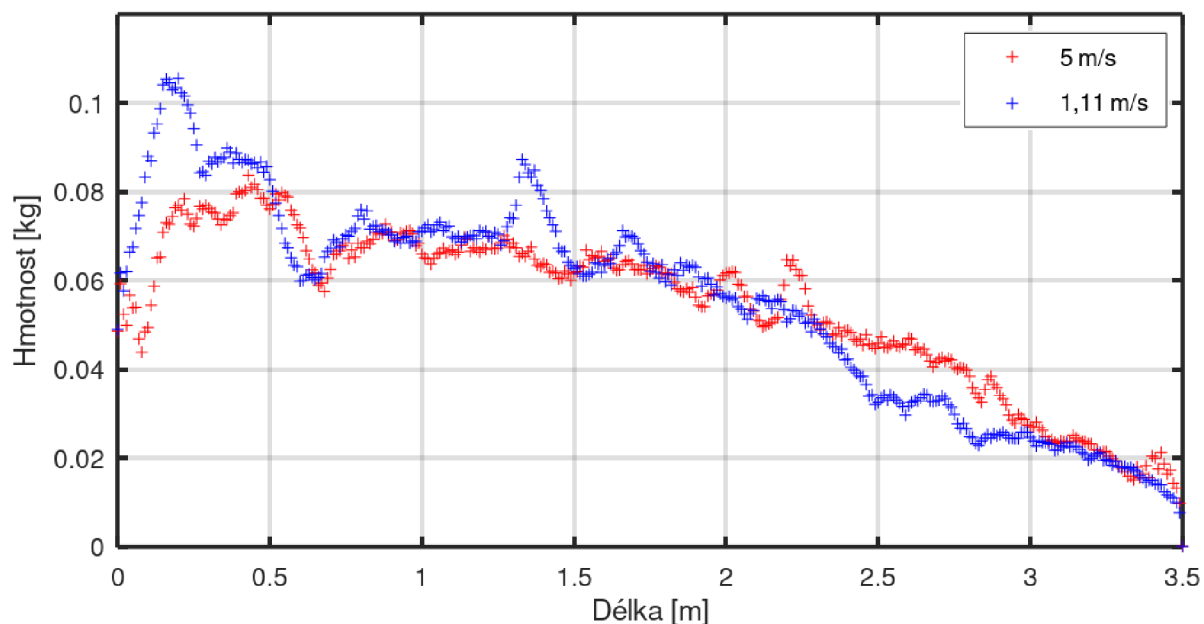


Obr. 28 Porovnání tvaru lože částic průměru 4,866 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo) ve vzdálenosti 0,7 m od začátku rotačního válce

6.5 Změna rychlosti proudění vzduchu

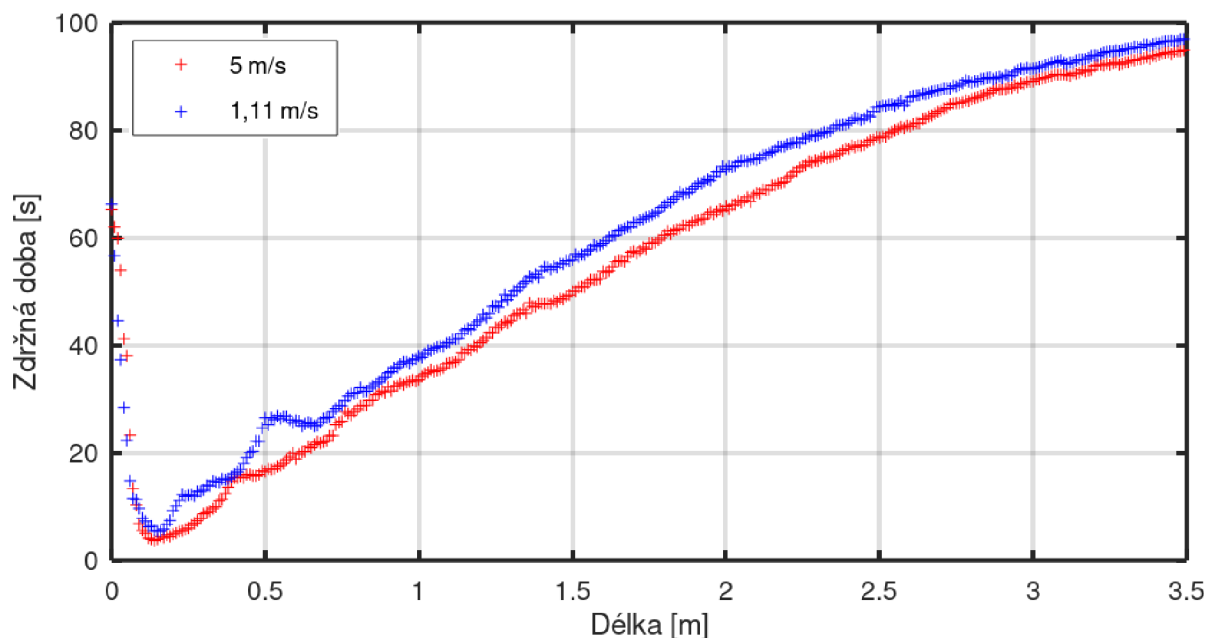
Bohužel o průtoku vzduchu sušárnou během experimentu [26] nebyl učiněn žádný záznam, navíc je prakticky obtížné stanovit množství přísávaného vzduchu do komory. Dosud byl v simulacích používán odhad vstupní rychlosti vzduchu 5 m/s, což odpovídá objemovému průtoku 4 838 m³/h. Proto byl na základě dostupných údajů o experimentu 2 (zaměřeného na sušení směsi drcených tetrapacků), uvedených v [26], učiněn řádový odhad množství vzduchu na vstupu do sušárny. Za předpokladu, že průtok vzduchu v sušárně během obou experimentů byl totožný, byl na základě uvedených údajů (spotřeba paliva a jeho výhřevnost, výstupní teplota spalin a teplo odvedené spalinami) s použitím výpočtového nástroje [35] stanoven odhad průtoku vzduchu sušárnou, jež čítal 990 Nm³/h. Pro vstupní plochu modelu o průměru 0,585 m, tato hodnota potom odpovídá přibližně vstupní rychlosti vzduchu 1,11 m/s. Tato hodnota byla nyní použita v simulaci, přičemž bylo použito výchozí nastavení pro konstantu tuhosti 400 N/m (Tab. 8).

V porovnání obou použitých rychlostí je zřejmé, že k největšímu rozdílu v axiálním rozložení částic (Obr. 29) dochází v okolí násypky, kdy vyšší rychlost dokázala posunout částice padající z násypky více kupředu (jedná se o jediné místo kde částice volně padají vzduchem a jsou přímo vystaveny vlivu proudícího vzduchu), a tak při nižší rychlosti je jasně patrný nárůst množství materiálu v přední části rotačního válce.



Obr. 29 Množství částic v závislosti na pozici pro dvě různé vstupní rychlosti vzduchu

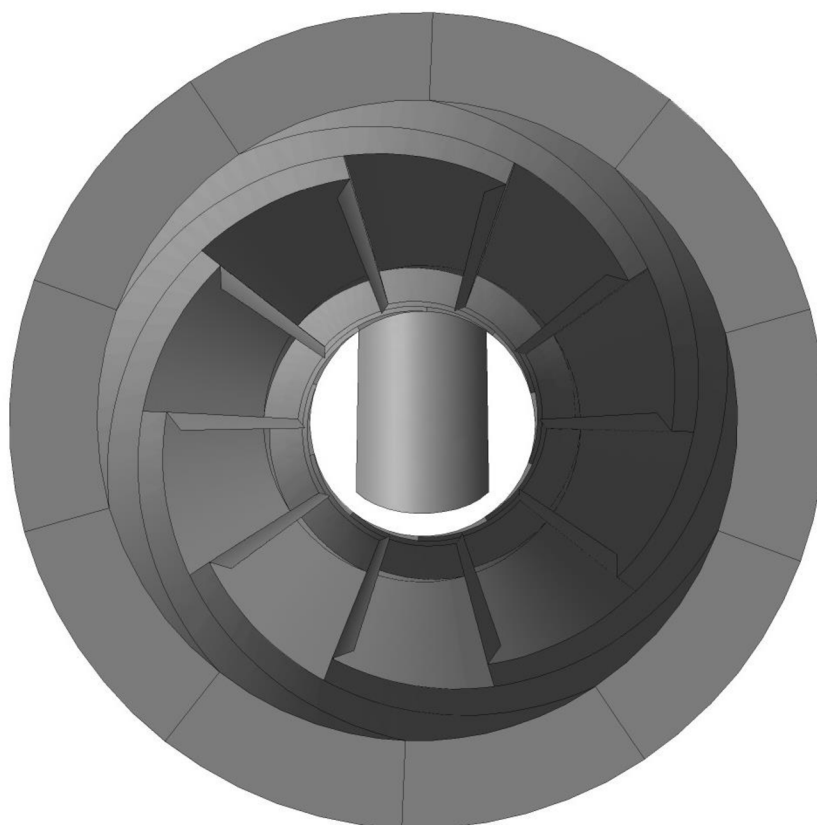
Rovněž se snížením rychlosti došlo i k nepatrnému růstu zdržné doby (viz Obr. 30), která s použitím metody 2 (interval spolehlivosti 95 %, koeficient determinace 0,975, bez váhových koeficientů a oblasti uvízlých částic) čítala $123,9 (\pm 4,5)$ (s). Oproti původním $122,7 (\pm 2,7)$ (s) však není tento rozdíl vzhledem k nejistotám nijak výrazný. Tato změna, s ohledem na změnu rozložení materiálu v okolí násypky by jistě získala na významu v případě, že by byla do modelu zahrnuta i lopatková vestavba.



Obr. 30 Vývoj průměrné zdržné doby v závislosti na pozici částic v rotačním válci pro dvě různé vstupní rychlosti vzduchu

6.6 Lopatková vestavba

Doposud byla prováděna simulace na bubnové sušárně bez vnitřní vestavby, ale jak již bylo zmíněno, v experimentu v diplomové práci [26] byla stanovena zdržná doba pisku v bubnové sušárně s lopatkovou vestavbou. Proto s cílem přiblížit se více tomuto experimentu, byl dosavadní model rozšířen o lopatkovou vestavbu. Tato vestavba (graficky znázorněna níže na Obr. 31) sestává z dvou různých druhů lopatek, kdy v přední a koncové části se jedná o lopatky šroubovicového tvaru a prostřední, nejdelší úsek je opatřen přímými lopatkami s ohnutými konci, přičemž nutno podotknout, že mezi pláštěm a samotnými lopatkami se nachází úzká mezera, jejíž šířka (6 mm) je větší než velikost částic. Pro účel simulace byly lopatky opět zjednodušené do formy plechu nekonečně malé tloušťky.

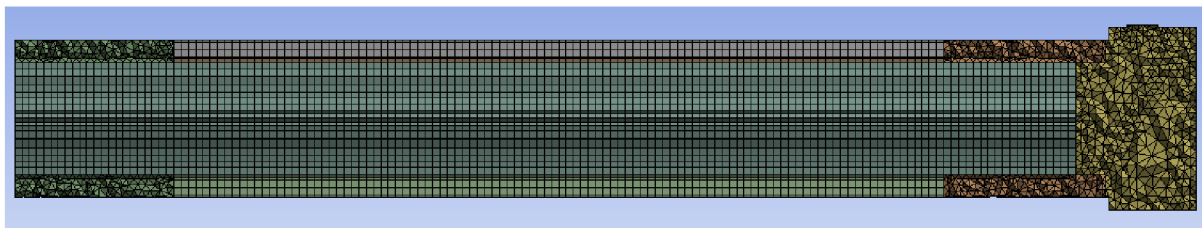


Obr. 31 Pohled do nitra modelu s lopatkovou vestavbou

K výpočtu byla použita hybridní hexahedrální a tetrahedrální síť (zobrazena v řezu na Obr. 32) obsahující celkem 161 000 buněk. Základní metriky kvality sítě jsou uvedeny v Tab. 15.

Parametr	Průměrná hodnota	Nejhorší hodnota	Podíl částic s nejhorší hodnotou (%)
Ortogonalita (Orthogonality)	0,803	0,185	0,11
Šikmost (Skewness)	0,238	0,815	0,11
Kvalita elementu (Element quality)	0,843	0,167	0,011

Tab. 15 Základní metriky kvality použité sítě



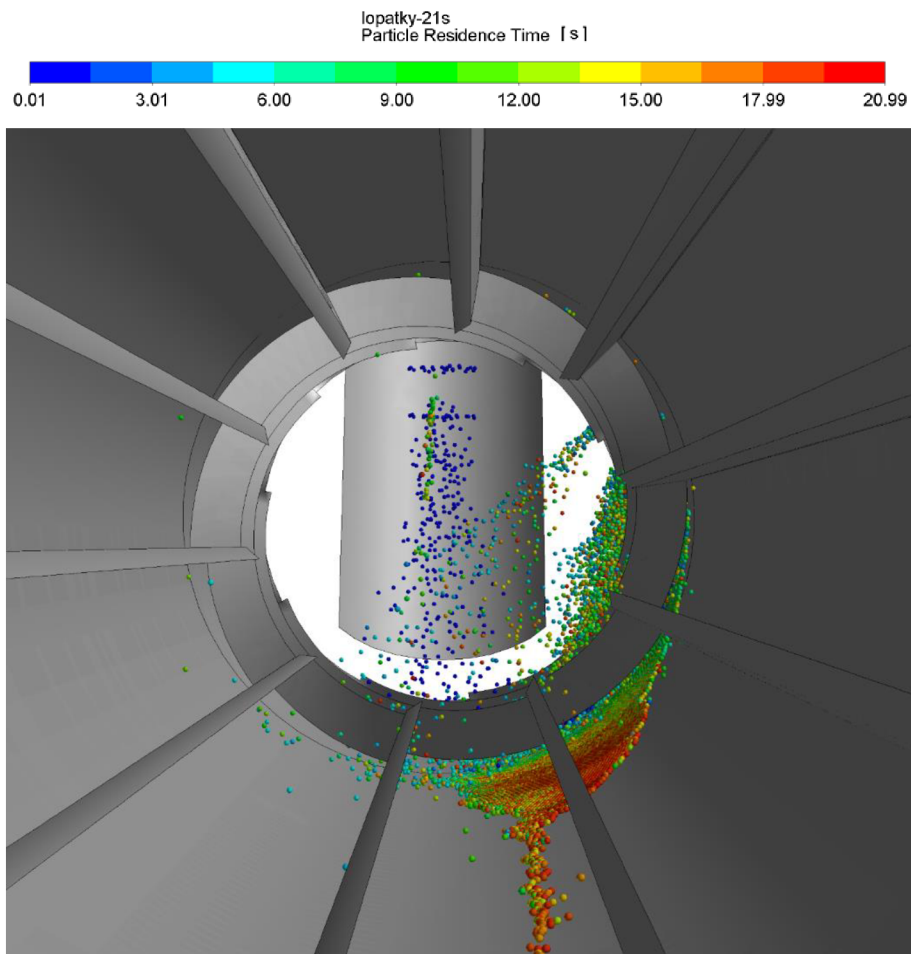
Obr. 32 Řez sítí použité v modelu s lopatkovou vestavbou

V simulaci bylo použito výchozí nastavení s konstantou tuhosti 400 N/m (viz Tab. 8), přičemž z důvodu použití metody pohyblivé sítě (tzv. Sliding Mesh) bylo nutno použít i nižší časový krok kontinuální fáze, který nyní čítal 0,001 s, čímž došlo společně s jemnější sítí k výraznému nárůstu výpočetní doby. Dosud používaný model turbulence k- ϵ realizovatelný, bylo nutno z důvodů dosažení limitních hodnot turbulentní viskozity u některých buněk kontrolního objemu, nahradit modelem k- ϵ RNG, jež je vhodnější pro aplikace zahrnující pohyblivou síť.

Bohužel během výpočtu docházelo k častému pádu simulace (nastala náhlá skoková změna hodnot residuí a následně divergence výpočtu). Při zpětné inspekci bylo zjištěno, že v mezeře mezi lopatkovou vestavbou a pláštěm se vlivem malé velikosti této mezery nacházely menší buňky kontrolního objemu, než ve zbylých částech domény a některé z nich, zvláště v místě napojení tetrahedrální sítě na hexahedrální síť, měly objemový podíl pevné fáze blízký 1. Zároveň některé částice v této mezeře uvízly a zůstaly zde zaklíněné, i když se příslušná lopatka nacházela v horní poloze a logicky by tedy vlivem gravitace měly vypadnout. Proto byl pro další simulaci vliv této mezery na pohyb materiálu zanedbán a tato mezera ucpána (lopatky byly protáhnuty až k plášti rotačního válce). Tímto došlo k odstranění oněch problémových malých buněk a poklesu celkového počtu buněk kontrolního objemu na 141 000.

Tato úprava však k vyřešení problému nevedla, kdy opět docházelo k pádu výpočtu. Proto bylo přistoupeno ke změně verze výpočtového softwaru Fluent na 2019 R3. V původně použité verzi 19.1, pro použitý model proudění/toku plynu a pevné fáze nebyla možnost volby konkrétního schéma prostorové diskretizace tlaku a tlak byl korigován na základě celkové objemové kontinuity. Ve verzi 2019 R3 již ale pro použitý model možnost volby byla, přičemž jako výchozí bylo nastaveno schéma PRESTO!, pro něž výpočet dále probíhal bez problémů, avšak není zaručeno, že tímto došlo k zamezení dalším pádům úlohy.

Bohužel z důvodu výše zmíněných komplikací nebyl nasimulován dostatečně dlouhý časový úsek pro získání vypovídajících dat. Výpočet byl z časových důvodů ukončen po 21 sekundách, přičemž aktuální stav v doméně ilustruje Obr. 33.



Obr. 33 Úloha s lopatkovou vestavbou, stav v doměně po 21 sekundách

7 Závěr

V této práci byl pomocí výpočtové dynamiky tekutin (CFD) modelován pohyb partikulární látky v rotační sušící peci, která se nachází na pracovišti Ústavu procesního inženýrství, VUT v Brně. K tomuto účelu byl použit přístup Euler-Lagrange, přičemž k reprezentaci sypkého materiálu byly použity sférické částice a k modelování samotných interakcí mezi částicemi byla použita metoda diskretních prvků DEM, jejíž parametry byly zvoleny na základě rešerše v oblasti vědeckých prací zaměřených na CFD-DEM simulace rotačních pecí. Provozní podmínky pece byly nastaveny dle experimentu se suchým pískem, popsáním v dřívější diplomové práci obhajované rovněž na Ústavu procesního inženýrství.

Pro tento model byla provedena 100sekundová simulace, na základě které byl v rámci postprocesingu dat vytvořen regresní model průměrné zdržné doby pro dané nastavení a byla tak stanovena zdržná doba materiálu v bubnové sušárně nevybavené lopatkovou vestavbou. Tato hodnota byla následně porovnávána se třemi empirickými vztahy uvedenými v dostupné literatuře, přičemž se dvěma z nich vykazovala dobrou shodu (rozdíl do 5 %). Rovněž byl sledován příčný pohyb materiálu v rotačním válci, kdy na základě série příčných průřezů uskutečněných v konstantních časových intervalech, bylo možno usoudit, že režim příčného pohybu materiálu v modelu odpovídá předpokládanému válivému režimu určenému na základě provozních podmínek a empirických vztahů. Tato simulace rovněž sloužila jako výchozí pro následné simulace testující vliv vybraných vstupních parametrů modelu na predikci pohybu částic a jejich zdržnou dobu.

Pro odhadovaný parametr DEM modelu kolizí, jimž byla konstanta tuhosti, bylo provedeno několik simulací, ve kterých byl sledován vliv velikosti této konstanty na celkovou zdržnou dobu. Na základě provedených výpočtů bylo možno vysledovat trend, že s poklesem hodnoty této konstanty dochází k růstu zdržné doby, avšak tento poznatek nelze ověřit z rešerše.

Rovněž byl sledován i vliv dalších parametrů, jako jsou velikosti částic a průtok vzduchu sušárnou na rozložení materiálu v sušárně. Zmenšením částic a tím i přiblížením se skutečné velikosti zrn materiálu, došlo k vizuálně věrohodnější reprezentaci lože v příčném průřezu, režimu pohybu a změně rozložení materiálu v bubnu sušárny, kdy došlo k celkovému posunu směrem k ústí sušárny. Tento krok měl však za následek značný nárůst výpočetní doby. Snížením celkového průtoku vzduchu a tím i snížení rychlosti proudění vzduchu v zařízení, došlo ke změně rozložení materiálu v sušárně, zvláště v oblasti v okolí násypky, avšak vliv změny průtoku vzduchu na celkovou zdržnou dobu nebyl nijak významný.

Dále byl model s cílem přiblížit se dostupným naměřeným datům na dané bubnové sušárně rozšířen i o lopatkovou vestavbu. Bohužel se jednalo o časově náročnější simulaci, při níž se vyskytovaly komplikace se stabilitou výpočtu a v případné další práci by bylo vhodné tento model ještě dopracovat. Další možností budoucího pokračování s cílem ještě více se přiblížit experimentu by mohlo být použití v modelu s lopatkovou vestavbou menších částic. Tímto by došlo jednak k samotné lepší reprezentaci materiálu použitého v experimentu a rovněž k poklesu vzájemného poměru velikostí částic a buněk výpočtové sítě, což by mohlo způsobit pokles maximálních hodnot objemového podílu pevné fáze v buňkách výpočtové sítě při zahrnutí do výpočtu i vlivu mezery mezi lopatkovou vestavbou a pláštěm rotačního válce.

8 Seznam použité literatury

- [1] VIJAYAN, S. N. a S. SENDHILKUMAR.: Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors - A Review. *International Journal of Engineering Innovation & Research*. [online]. 2014, **342**(3). [cit. 2020-05-08]. ISSN 2277-5668. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317041159_Industrial_Applications_of_Rotary_Kiln_in_Various_Sectors-A_Review
- [2] Question of the Week: What are the Top Applications for Rotary Dryers?. *FEECO International, Inc.* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://feeco.com/question-of-the-week-what-are-the-top-applications-for-rotary-dryers/>
- [3] BHANDARI, B.: Handbook of Industrial Drying, Third Edition Edited by A. S. Mujumdar: CRC Press. *Drying Technology*. Taylor & Francis Group, 2015, **33**(1), 128-129 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1080/07373937.2014.983704. ISSN 0737-3937.
- [4] The Rotary Dryer Handbook [online]. In: FEECO International, 2017 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: https://www.academia.edu/34041416/Rotary_Dryer_Handbook
- [5] Flights (rotary dryer) - Wikipedia. [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Flights_\(rotary_dryer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Flights_(rotary_dryer))
- [6] BOATENG, A. A.: 2 - Basic Description of Rotary Kiln Operation. *Rotary Kilns*. Second Edition. Elsevier, 2016, 13-26. DOI: 10.1016/B978-0-12-803780-5.00002-2. ISBN 9780128037805.
- [7] LIU, X. Y. a E. SPECHT.: Mean residence time and hold-up of solids in rotary kilns. *Chemical Engineering Science* [online]. Elsevier, 2006, **61**(15), 5176-5181 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.ces.2006.03.054. ISSN 0009-2509. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250906002429>
- [8] BERNARD, P. a P. DITL.: Generalizace pohybu částic v rotační peci. *CHEMAGAZÍN*. Praha: CHEMAGAZÍN, 2019, **XXIX**, 36-37. ISSN 1210-7409. Dostupné z: http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/PDF_full/Chemagazin_4-2019.pdf
- [9] HÁJEK, J.: Modelování s využitím CFD-I: Studijní materiál pro 2. stupeň magisterského studia. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008.
- [10] MAIONE, R., S. KIESGEN DE RICHTER, G. MAUVIEL a G. WILD.: DEM investigation of granular flow and binary mixture segregation in a rotating tumbler: Influence of particle shape and internal baffles. *Powder Technology* [online]. Elsevier B.V, 2015, **286**, 732-739 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.09.011. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591015300590>

- [11] SCHERER, V., M. MÖNNIGMANN, M. O. BERNER a F. SUDBROCK.: Coupled DEM–CFD simulation of drying wood chips in a rotary drum – Baffle design and model reduction. *Fuel* [online]. Elsevier, 2016, **184**, 896-904 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.05.054. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116303696#b0070>
- [12] YIN, H., M. ZHANG a H. LIU.: Numerical simulation of three-dimensional unsteady granular flows in rotary kiln. *Powder Technology* [online]. Elsevier B.V, 2014, **253**, 138-145 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.10.044. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591013006578>
- [13] WANGCHAI, S.: Numerical simulation of the flow of agricultural seeds inside a rotary drum dryer by DEM. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 301 (2019) 012048*. [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1088/1755-1315/301/1/012048. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/301/1/012048>
- [14] LI, D., G. LIU, H. LU, Q. ZHANG, Q. WANG a H. YU.: Numerical simulation of different flow regimes in a horizontal rotating ellipsoidal drum. *Powder Technology* [online]. Elsevier B.V, 2016, **291**, 86-96 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.12.007. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591015302199>
- [15] SEBASTIAN ESCOTET-ESPINOZA, M., C. J. FOSTER a M. IERAPETRITOU.: Discrete Element Modeling (DEM) for mixing of cohesive solids in rotating cylinders. *Powder Technology* [online]. Elsevier B.V, 2018, **335**, 124-136 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.05.024. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591018303942>
- [16] MAIONE, R., S. KIESGEN DE RICHTER, G. MAUVIEL a G. WILD.: Axial segregation of a binary mixture in a rotating tumbler with non-spherical particles: Experiments and DEM model validation. *Powder Technology* [online]. Elsevier B.V, 2017, **306**, 120-129 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.10.073. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591016307665>
- [17] KOMOSSA, H., S. WIRTZ, V. SCHERER, F. HERZ a E. SPECHT.: Transversal bed motion in rotating drums using spherical particles: Comparison of experiments with DEM simulations. *Powder Technology* [online]. Elsevier B.V, 2014, **264**, 96-104 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.05.021. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591014004665>
- [18] ALCHIKH-SULAIMAN, B., M. ALIAN, F. EIN-MOZAFFARI, A. LOHI a S. R. UPRETI.: Using the discrete element method to assess the mixing of polydisperse solid particles in a rotary drum. *Particuology* [online]. Elsevier B.V, 2016, **25**, 133-142 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.partic.2015.05.006. ISSN 1674-2001. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674200115001522>

- [19] GUI, N., J. YAN, W. XU, et al.: DEM simulation and analysis of particle mixing and heat conduction in a rotating drum. *Chemical Engineering Science* [online]. Elsevier, 2013, **97**, 225-234 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.ces.2013.04.005. ISSN 0009-2509. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250913002649>
- [20] LIU, P.Y., R.Y. YANG a A.B. YU.: DEM study of the transverse mixing of wet particles in rotating drums. *Chemical Engineering Science* [online]. Elsevier, 2013, **86**, 99-107 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.ces.2012.06.015. ISSN 0009-2509. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250912003648>
- [21] SILVERIO, B., K. SANTOS, C. DUARTE, M. BARROZO a B. SILVERIO.: Effect of the Friction, Elastic, and Restitution Coefficients on the Fluid Dynamics Behavior of a Rotary Dryer Operating with Fertilizer. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2014, **53**(21), 8920-8926-8920-8926 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1021/ie404220h. ISSN 0888-5885. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/ie404220h>
- [22] JIANG, S., Y. YE, M. HE, et al.: Mixing uniformity of irregular sand and gravel materials in a rotating drum with determination of contact model parameters. *Powder Technology* [online]. Elsevier B.V, 2019, **354**, 377-391 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.06.005. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591019304486>
- [23] HOBBS, A.: Simulation of an aggregate dryer using coupled CFD and DEM methods. *International Journal of Computational Fluid Dynamics: CFD Methods of Mining and Mineral Processing* [online]. Taylor & Francis, 2009, **23**(2), 199-207 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1080/10618560802680971. ISSN 1061-8562. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10618560802680971>
- [24] SHI, D., W. L. VARGAS a J.J. MCCARTHY.: Heat transfer in rotary kilns with interstitial gases. *Chemical Engineering Science* [online]. Elsevier, 2008, **63**(18), 4506-4516 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.ces.2008.06.006. ISSN 0009-2509. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250908003291>
- [25] WITT, P. J., M. D. SINNOTT, P. W. CLEARY a M. P. SCHWARZ.: A hierarchical simulation methodology for rotary kilns including granular flow and heat transfer. *Minerals Engineering* [online]. Elsevier, 2018, **119**, 244-262 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.01.035. ISSN 0892-6875. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687518300463>
- [26] RAFAJ, S.: Rotační sušící a sintrovací pece. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Skryja, Ph.D.

- [27] MARCHELLI, F., C. MOLINER, B. BOSIO a E. ARATO.: A CFD-DEM sensitivity analysis: The case of a pseudo-2D spouted bed. *Powder Technology* [online]. Elsevier B.V, 2019, **353**, 409-425 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.05.035. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591019303754>
- [28] MCCLURE, J.: Fluid Configurations in a Random Sphere Packing - Project - Digital Rocks. *Home - Digital Rocks* [online]. Dostupné z: <https://www.digitalrockportal.org/projects/41>
- [29] LIU, D., C. BU a X. CHEN.: Development and test of CFD-DEM model for complex geometry: A coupling algorithm for Fluent and DEM. *Computers and Chemical Engineering* [online]. Elsevier, 2013, **58**(C), 260-268 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2013.07.006. ISSN 0098-1354. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098135413002263>
- [30] MAHMOODI, B., S. H. HOSSEINI, M. OLAZAR a H. ALTZIBAR.: CFD-DEM simulation of a conical spouted bed with open-sided draft tube containing fine particles. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* [online]. Elsevier B.V, 2017, **81**, 275-287 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.jtice.2017.09.051. ISSN 1876-1070. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1876107017305163>
- [31] ANSYS Academic Research CFD, Release 19.1, ANSYS Fluent Theory guide, ANSYS, Inc.
- [32] ANSYS Academic Research CFD, Release 2019R3, ANSYS Fluent Theory guide, ANSYS, Inc.
- [33] GLOVER, T.J.: Pocket Reference, 2nd ed. Sequoia Publishing, Inc, 1997.
- [34] LI, S., J. YAN, R. LI, Y. CHI a K. CEN.: Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns - Part I. Experimental. *Powder Technology* [online]. ELSEVIER SCIENCE, 2002, **126**(3), 217-227 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.1016/S0032-5910(02)00014-1. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591002000141>
- [35] NEJEZCHLEB, R.: Fyzikální vlastnosti a spalovací charakteristiky paliv. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vít Kermes, Ph.D.

9 Seznam použitých symbolů

\vec{a} (m/s ²)	Zrychlení
C_D (-)	Koeficient odporu
C_ω (-)	Součinitel rotačního odporu
d_p (m)	Průměr částice
D (m)	Průměr rotačního válce
\vec{e}_{12} (-)	Jednotkový vektor
f_{ztrat} (-)	Ztrátový faktor
f (N/m ³)	Složky objemové síly
\vec{F}_1 (N)	Síla působící na částici
\vec{F}_{kol} (N)	Síla kolizní
F_n (N)	Normálová síla
Fr (-)	Froudovo číslo
F_t (N)	Třecí síla
F_{vol} (N)	Síla válivého odporu
\vec{g} (m/s ²)	Tíhové zrychlení
H (kg)	Celkové množství materiálu v rotačním válci
I_p (kg.m ²)	Moment setrvačnosti částice
k (N/m)	Konstanta tuhosti
K_{sg} (kg/(m ³ .s))	Koeficient mezifázové výměny hybnosti
L (m)	Délka rotačního válce
m (kg)	Hmotnost částice
$\dot{m}_{pg}/\dot{m}_{gp}$ (kg/(m ³ .s))	Přenos hmoty z pevné fáze do plynné/z plynné do pevné
M (kg/s)	Hmotnostní tok materiálu dávkovačem
n (°)	Dynamický sypaný úhel

N (ot/min)	Otáčky rotačního válce
p (Pa)	Statický tlak
r (m)	Poloměr částice
R (m)	Poloměr rotačního válce
Re_p (-)	Relativní Reynoldsovo číslo
Re_ω (-)	Rotační Reynoldsovo číslo
$S_{DPM,explicit}$ (N/m ³)	Explicitní zdrojový člen výměny hybnosti
S_m (kg/(m ³ .s))	Přenos hmotnosti do kontinuální fáze
t (s)	Čas
t_{kolize} (s)	Doba trvání kolize mezi dvěma částicemi
\vec{v}_g/\vec{v}_p (m/s)	Rychlost plynu/částice
$\vec{v}_{gp}/\vec{v}_{pg}$ (m/s)	Mezifázová rychlost
\dot{V} (m ³ /min)	Objemový průtok sušeného materiálu

Řecké symboly

α (-)	Objemový podíl fáze
γ (kg/s)	Koeficient tlumení
δ (m)	Přesah
ΔT_{DEM} (s)	Délka časového kroku DEM
η (-)	Koeficient restituce
θ (°)	Úhel sklonu rotačního válce
μ (-)	Součinitel tření
μ_g (Pa.s)	Dynamická viskozita plynu
μ_{vo} (-)	Součinitel válivého odporu
ρ (kg/m ³)	Hustota
$\bar{\tau}$ (s)	Průměrná zdržná doba
τ_{xx} (N/m ²)	Složky tenzoru viskosního napětí

τ_r (s)	Charakteristický čas částice
ω (rad/s)	Rychlost rotace bubnu
$\vec{\omega}_p$ (m/s ²)	Úhlová rychlost částice
$\vec{\Omega}$ (rad/s)	Relativní úhlová rychlost na rozhraní plyn částice