

DEM-MBD ANALÝZA VERTIKÁLNIHO KOLOVÉHO MLÝNU PRO TVORBU PRODUKTU <125 MIKROMETRU

Jiří Fröhbauer¹

¹Ústav automobilního a dopravního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení
technické v Brně, Jiri.Fruhbauer@vutbr.cz

DEM-MBD ANALYSIS OF A VERTICAL WHEEL MILL FOR PRODUCTION <125 MICROMETERS

Abstract: *This article deals with the creation of a virtual model of a vertical roller mill using DEM-MBD co-simulation in the EDEM-MotionSolve environment. The main goal is to apply material models that will allow the prediction of granulometric characteristics and size specific energy for a product passing 125 μm . DEM simulates the behavior of mineral particles, while MBD models simulate the dynamics of mechanical components.*

Key words: *DEM, MBD, Vertical roller mill, Size specific energy*

1. ÚVOD

Vertikální kolové mlýny (Vertical Roller Mill - VRM) fungují na principu rotace desky, ke které jsou přitlačována mlecí kola. Materiál je přiváděn do středu válce, kde je rozháněn a stlačován mezi mlecími koly a deskou. Kola jsou zatížena hydraulickým přtlakem, který materiál drtí a mele na jemnější částice dané velikosti. Rozemletý materiál je unášen proudem vzduchu směrem k větrnému separátoru, který odděluje jemné částice od hrubých. Jemné částice jsou odváděny jako hotový produkt, zatímco hrubé se vrací zpět pod válce k dalšímu mletí. Konstrukce VRM umožňuje nejen mletí, ale i sušení materiálu díky využití horkého vzduchu, což je výhodné zejména při zpracování surovin s vyšší vlhkostí. Oproti kulovým mlýnům má VRM nižší spotřebu energie (o 30–50 %) [1]. Díky integrovanému separátoru není nutný předmlecí stupeň a regulace jemnosti se provádí změnou otáček separátoru. U návrhu prototypu VRM je však odhad výsledných parametrů složitý, proto se nabízí možnosti virtuálního prototypu s použitím DEM simulací. Pro další zpřesnění modelu je možné propojit DEM simulaci s MBD modelem, aby výsledky více odpovídaly reálnému měření.

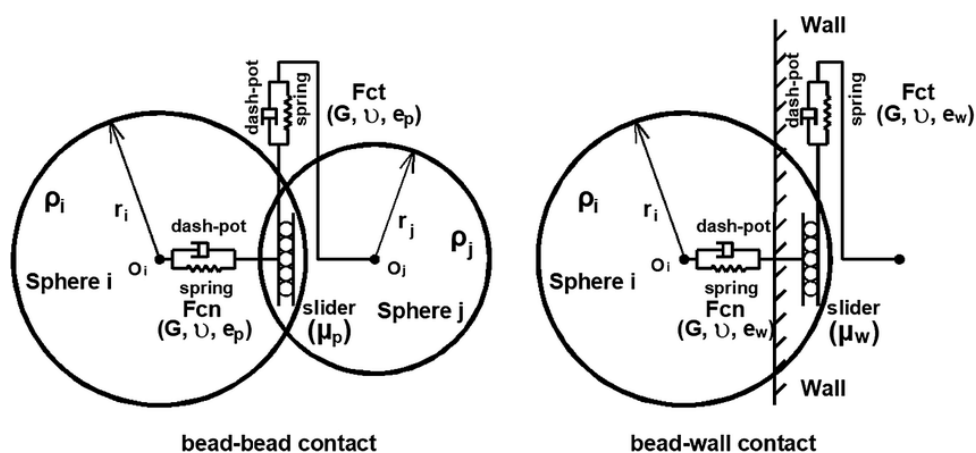
2. TVORBA MATERIÁLOVÉHO DEM MODELU DRCENÉHO MATERIÁLU

Metoda diskretních elementů (DEM) je numerický přístup určený k simulaci pohybu a vzájemných srážek částic. Díky své schopnosti věrně popsat chování sypkých a nespojitých materiálů se stala dobrým nástrojem při řešení technických úloh v této oblasti a je velmi vhodná pro modelování procesů drcení. Její nevýhodou je značná výpočetní náročnost, která v praxi omezuje

délku simulace nebo počet částic zahrnutých do modelu. Princip DEM spočívá v řešení Newtonových pohybových rovnic pro jednotlivé částice a v aplikaci kontaktních modelů pro určení sil působících při jejich interakci. Tyto síly se obvykle integrují explicitní metodou v čase, což umožňuje sledovat časový vývoj chování materiálu. Hlavním faktorem pro simulace procesů mletí je volba vhodného kontaktního modelu částic a volba odpovídajícího modelu rozměňování materiálu, aby výsledek co nejdříve odrážel reálné podmínky.

2.1. VOLBA KONTAKTNÍHO MODELU A DEM PARAMETRY ČÁSTIC

Pro simulaci kontaktních sil při interakci mezi částicemi navzájem nebo mezi částicemi a pracovní geometrií se nejčastěji využívá Hertz-Mindlinův kontaktní model. Tento model umožňuje s vysokou přesností popsat nelineární vztah mezi deformací částic a působícím zatížením. Jeho princip je znázorněn na obr. 1, kde je kontaktní síla v normálovém i tečném směru tvořena elastickou a tlumicí složkou [2]. Přenos třecí síly je modelován pomocí prvku typu slider (μ_p , μ_w), který sleduje, zda tečná složka nepřekročí maximální dovolenou třecí sílu. Model je také vhodný pro použití modelu vázaných částic a modelu náhrady částic.



Obr. 1 Tlumený Hertz-Mindlinův model interakce částic s normálovou a tečnou složkou kontaktních sil, popis interakce částice-částice (vlevo), popis interakce částice-pracovní geometrie (vpravo) [2]

Mechanické parametry částic pro DEM simulaci lze vidět v tab. 1.

Tab. 1 Mechanické parametry částic a pracovní geometrie

	Částice	Pracovní geometrie
Poissonův poměr	0.25	0.3
Hustota	2500 kg/m ³	7800 kg/m ³
Modul pružnosti ve smyku	80 MPa	80.7 GPa
Youngův modul pružnosti	200 MPa	210 GPa

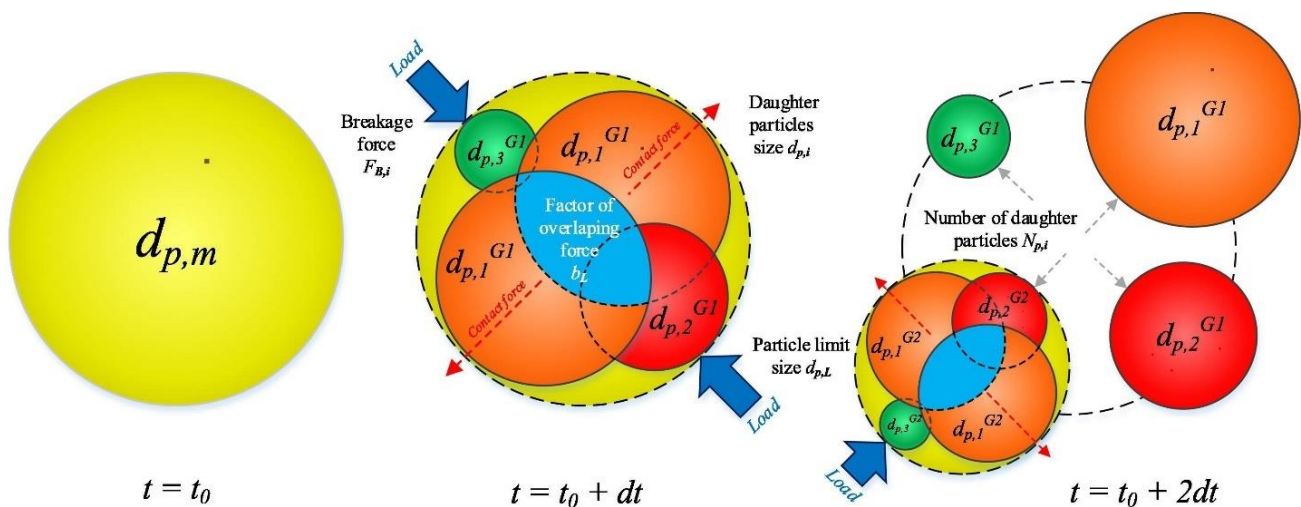
Fyzikální parametry kontaktního modelu pro DEM simulaci lze vidět v tab. 2.

Tab. 2 Fyzikální vlastnosti kontaktu částice-částice a částice-geometrie

	Částice-částice	Částice-pracovní geometrie
Součinitel tření	0.5	0.5
Koeficient valivého odporu	0.3	0.2
Koeficient restituce	0.3	0.2

2.2. VOLBA MATERIÁLOVÉHO MODELU ROZPADU ČÁSTIC

Pro popis rozpadu částic byl použit model náhrady částic (Particle Replacement Model), který se zaměřuje na detailní simulaci porušování křehkých materiálů. Model bere v úvahu jak variabilitu vlastností, tak vliv velikosti částic na pravděpodobnost porušení a na citlivost mikrostruktury při opakovaném zatěžování. Po překročení stanovené energie porušení konkrétní částice umožňuje tento přístup vygenerovat nové fragmenty podle předem definovaných parametrů. Mechanismus porušení závisí jak na materiálových vlastnostech, tak na charakteru zatěžování jednotlivých částic. Každá částice má přiřazenu vlastní hodnotu energie porušení, a pokud je tato hodnota překročena, mateřská částice je okamžitě nahrazena shlukem menších fragmentů, jak je znázorněno na obr. 2.



Obr. 2 Princip funkce náhrady mateřské částice shlukem menších fragmentů během porušení [3]

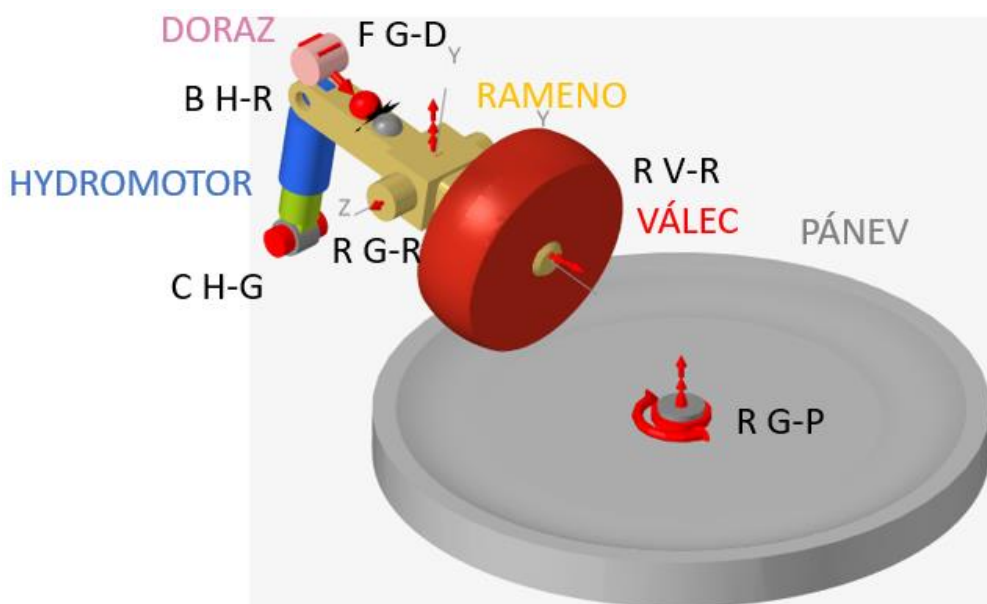
Model v softwaru EDEM je definován pomocí několika konstant zjištěných z fyzických dat. Pro analýzu VRM byly voleny konstanty v rozsahu z help webu EDEM, jelikož by fyzické měření bylo časově náročné na vyhodnocení konstant. Tyto hodnoty lze vidět v tab. 3.

Tab. 3 Parametry modelu náhrady častí pro simulaci

Poškození mikrostruktury	Konstanta poškození γ	4
Hodnota mediánové energie porušení částice	Parametr ustálení E_{∞}	300 J/kg
	Parametr přechodu d_0	6 mm
	Parametr sklonu ϕ	0.4
Rozložení pravděpodobnosti porušení	Rozptyl hodnot σ	0.3
	Horní parametr zkrácení TR	10
Rozdělení velikosti částic po porušení dle t_{10}	Parametr ustálení A	66.7 %
	Parametr tvaru b	0.033

3. TVORBA VIRTUÁLNÍHO MBD MODELU VRM

Multi-body model VRM byl vytvořen v softwaru MotionSolve, který je vhodný pro obousměrnou kosimulaci se softwarem EDEM. Model se skládá ze čtyř částí, a to rotující pánve, válce, ramene, dorazu a hydromotoru. Do hydromotoru byla přidána pružina s tuhostí 200 N/mm pro nastavení konstantního přitlaku 0.4, 0.6 a 0.8 MPa. Pro vzájemné spojení komponent a groundu byly použity kinematické vazby, konkrétně vazby „Fixed (F)“, „Revolute (R)“, „Cylindrical (C)“ a „Ball (B)“ pro dosažení 2 stupňů volnosti (volná rotace válce a naklápění ramene). Pro zjednodušení analýzy byl uvažován pouze 1 mlecí válec.



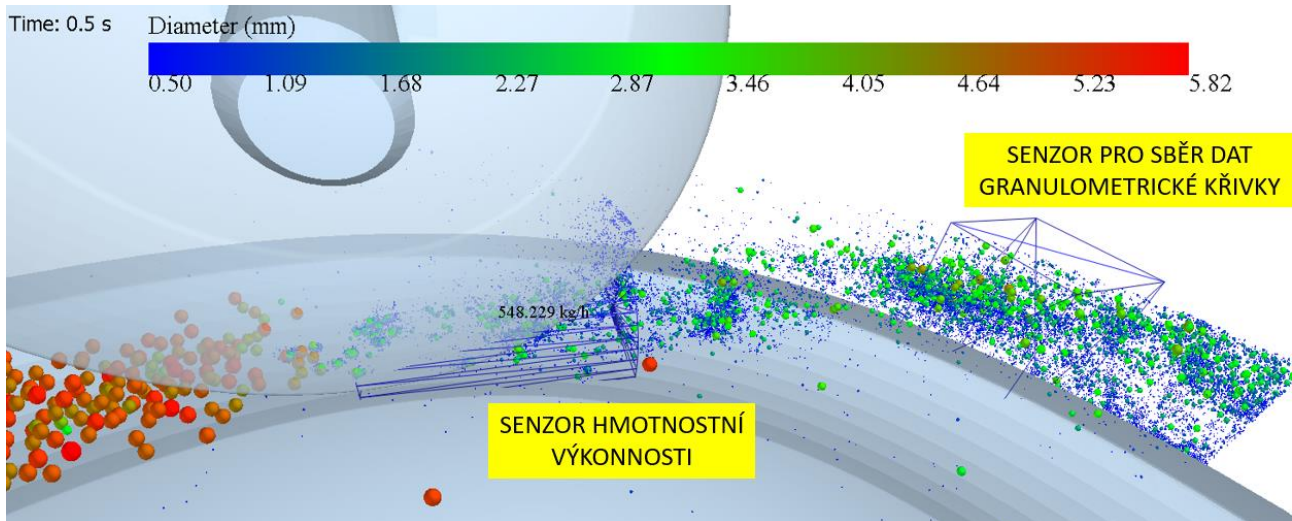
Obr. 3 Vytvořený MBD model VRM v prostředí MotionSolve

Další parametry mlýnu jako rychlost otáčení excentrické hřídele byla nastavena na 180 ot./min. a minimální nastavení štěrbin mlýnu bylo nastaveno na 2, 3 a 4 mm. Přitlak je vypočítán jako síla vůči průmětné ploše válce dle:

$$p_V = \frac{F_{př}}{D_V \cdot B_V} \quad (1)$$

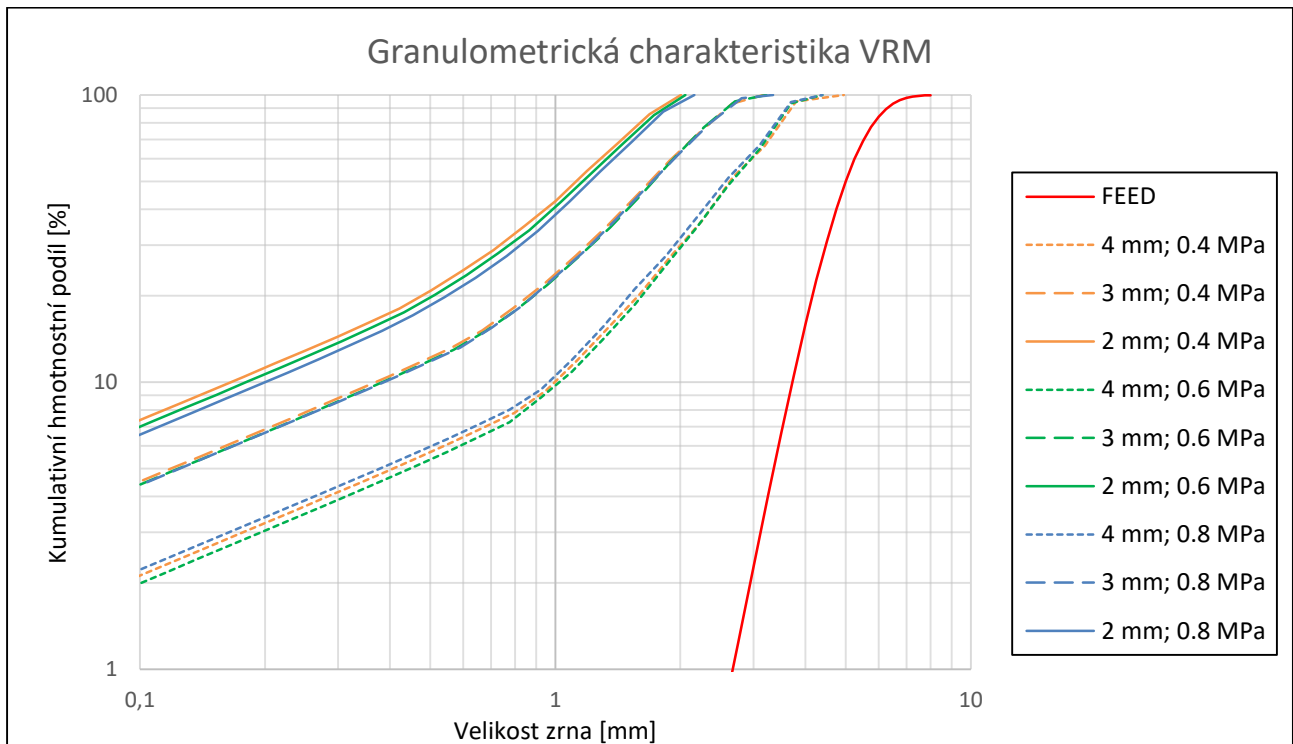
4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ KOSIMULACE VERTIKÁLNÍHO KOLOVÉHO MLÝNU

Hlavní parametry, které byly sledovány u analýzy VRM jsou hmotnostní výkonnost, výkon pro pohon mlecí pánve a granulometrická charakteristika VRM při různém nastavení mezery a přítlaku. Snímek z kosimulace MBD-DEM pro vyhodnocení parametrů lze vidět na obr. 4 spolu s umístěním senzorů.



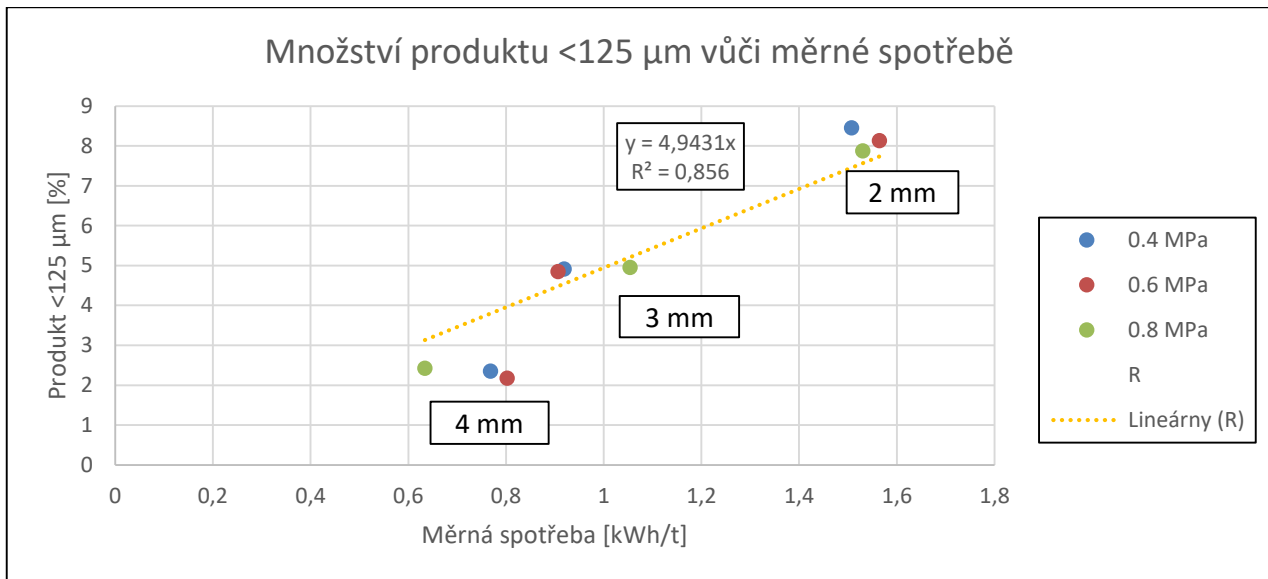
Obr. 4 Snímek průběhu kosimulace EDEM-MotionSolve při mletí vstupních zrn se zobrazením senzorů výstupních parametrů

Granulometrická charakteristiku lze vidět na obr. 5, kde je možné sledovat, že hlavní vliv na výstupní hrubost produktu má nastavení mezery a malý, avšak nezanedbatelný vliv má přítlak válce.



Obr. 5 Granulometrická charakteristika výstupního produktu při různých nastavení mezery 2-4 mm a přítlaku 0.4-0.8 MPa, vyhodnoceno pomocí EDEMPy

Pro názornější představení vlivu nastavení parametrů VRM je množství produktu <125 μm porovnáno s měrnou spotřebou energie, kde lze na obr. 6 pozorovat silnou závislost mezi porovnávanými parametry.

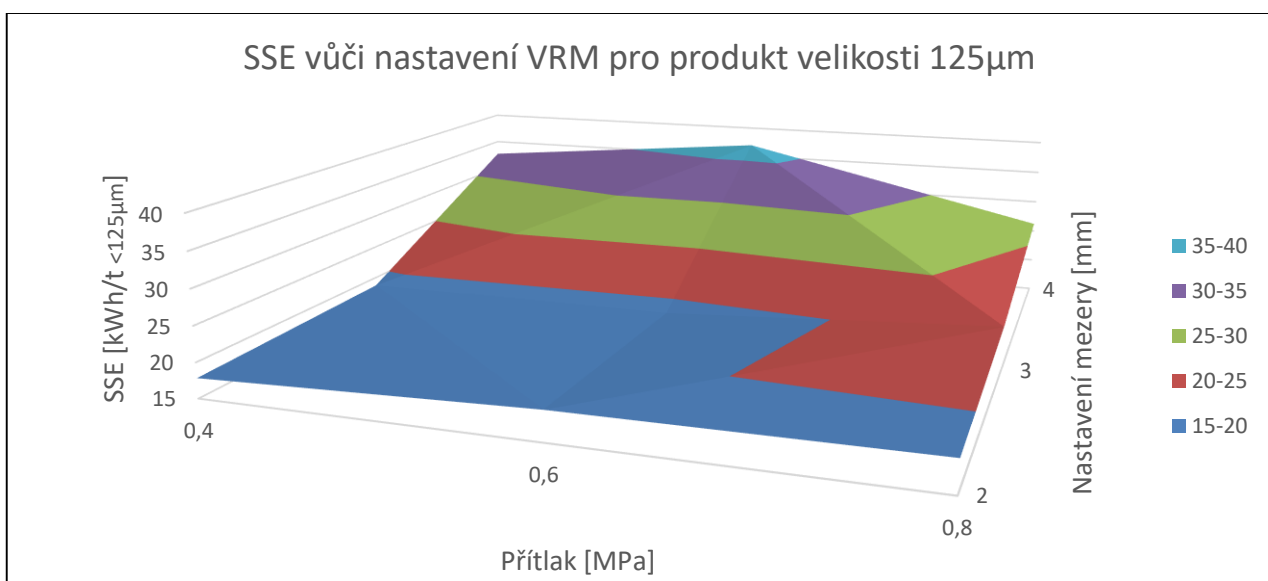


Obr. 6 Závislost mezi množstvím vytvořeného produktu pod 125 μm a množstvím dodané měrné energie

Posledním krokem je výpočet specifické spotřeby energie (SSE) pro velikost produktu <125 μm. Ta je vypočítána z průměrných hodnot výkonu (P_{pr}), hmotnostní výkonnosti (Q_{pr}) a množství produktu <125 μm ($p_{125\mu m}$) při daném nastavení mezery a přítlaku.

$$SSE_{125\mu m} = \frac{P_{pr} [kW]}{p_{125\mu m} [\%] \cdot Q_{pr} [t/h]} \quad (2)$$

Výsledné hodnoty SSE při různých nastavení mezery a přítlaku lze vidět na obr. 7.



Obr. 7 Mapa výsledných hodnot SSE vůči přítlaku a nastavení mezery

5. ZÁVĚR

Kosimulace DEM–MBD se ukázala jako efektivní nástroj pro predikci a optimalizaci parametrů VRM již ve fázi počítačového prototypu. Analýza granulometrické charakteristiky ukazuje postupné zjemňování produktu se zmenšující se mezerou, zatímco u přítlaku by bylo vhodné zvážit širší rozsah hodnot. SSE naznačuje zvyšující se účinnost při snižování rozměru mezery, přičemž přítlak má na hodnoty SSE pouze omezený vliv, pravděpodobně z důvodu jeho nízkých hodnot v simulaci. Pro dosažení optimálních výsledků je žádoucí přesně znát mechanické a kontaktní parametry materiálu, zejména parametry modelu náhrady částic, které by výrazně mohly ovlivnit efektivitu přítlaku.

LITERATURA

[1] FLSMIDTH & CO. A/S. OK™ Raw and Cement Mill. FLSMIDTH & CO. A/S. OK™ Raw and Cement Mill [online]. ©2024 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: <https://www.flsmidth-cement.com/products/ok-raw-and-cement-mill>

[2] CHUNG, Yun-Chi a Yu-Ren WU, 2019. Dynamic modeling of a gear transmission system containing damping particles using coupled multi-body dynamics and discrete element method. *Nonlinear Dynamics* [online]. **98**(1), 129-149 [cit. 2024-07-18]. ISSN 0924-090X. Dostupné z: doi:10.1007/s11071-019-05177-1

[3] JIMÉNEZ-HERRERA, Narcés, Gabriel K.P. BARRIOS a Luís Marcelo TAVARES, 2018. Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds. *Advanced Powder Technology* [online]. **29**(3), 692-706 [cit. 2024-07-18]. ISSN 09218831. Dostupné z: doi:10.1016/j.appt.2017.12.006

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu Technologické agentury České republiky v rámci programu Prostředí pro život SS07010045 Využití stavebních a demoličních odpadů pro výrobu cementových kompozitů se solidifikačním účinkem a sníženým dopadem na životní prostředí.