

## EKSPERIMENTALNA KARAKTERIZACIJA SPREJA IN NUMERIČNO MODELIRANJE RAZPRŠEVANJA SUSPENZIJE V RAZPRŠILNEM SUŠILNIKU

**Sprejeto**

19. 6. 2023

**Recenzirano**

20. 9. 2023

**Izdano**

7. 11. 2023

**Znanstveni vedi:**  
Naravoslovje in  
tehnika**Ključne besede:**eksperimentalna  
karakterizacija  
spreja,  
velikostna  
porazdelitev  
delcev,  
računalniška  
dinamika  
tekočin,  
razpršilno  
sušenje,  
sekundarni  
razpad  
delcevPETRA CAJNKO<sup>1</sup>, JURIJ ILJAŽ<sup>2</sup>, MATJAŽ HRIBERŠEK<sup>3</sup>,  
MATEJ ZADRAVEC<sup>4</sup> IN TIMI GOMBOC<sup>5</sup><sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in Matematiko, Maribor, Slovenija,  
petra.cajnko@um.si.<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija, jurij.iljaz@um.si.<sup>3</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija,  
matjaz.hribersek@um.si.<sup>4</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija,  
matej.zadavec@um.si.<sup>5</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija,  
timi.gomboc@um.si.

CORRESPONDING AUTHOR

timi.gomboc@um.si

Sušenje je eno izmed pomembnejših in hkrati najstarejših področij procesne tehnike. Ena izmed zelo uveljavljenih oblik sušenja je razpršilno sušenje, ki je zelo pogosto prisotno v živilski, farmacevtski in kemijski industriji. V danem prispevku obravnavamo karakterizacijo formiranja spreja na razpršilni šobi in izvedbo numerične simulacije z vključenim sekundarnim razpadom spreja. Karakterizacija spreja na šobi je bila izvedena na sistemu Oxfor laser, medtem ko je za izvedbo numeričnih simulacij bil uporabljen programski paket Ansys Fluent. Primerjava rezultatov je pokazala dobro ujemanje med velikostno porazdelitvijo delcev pridobljeno pri eksperimentu in pri numerični simulaciji.

## EXPERIMENTAL SPRAY CHARACTERIZATION AND NUMERICAL MODELING OF SUSPENSION SPRAYING IN A SPRAY DRYER

Petra Cajnko<sup>1</sup>, Jurij Iljaž<sup>2</sup>, Matjaž Hriberšek<sup>3</sup>, Matej  
Zadravec<sup>4</sup> in Timi Gomboc<sup>5</sup>

<sup>1</sup> University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia, petra.cajnko@um.si.

<sup>2</sup> University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia, jurij.iljaz@um.si.

<sup>3</sup> University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia, matjaz.hribersek@um.si.

<sup>4</sup> University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia, matej.zadravec@um.si.

<sup>5</sup> University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia, timi.gomboc@um.si.

DOPISNI AVTOR

timi.gomboc@um.si

Accepted

19. 6. 2023

Revised

20. 9. 2023

Published

7. 11. 2023

Drying is one of the most important and at the same time the oldest areas of process technology. One of the most established forms of drying is spray drying, which is very often present in the food, pharmaceutical and chemical industries. In this paper, we discuss the characterization of the spray formation on the spray nozzle and the implementation of numerical simulation with included secondary breakup of the spray. The characterization of the spray on the nozzle was performed on the Oxfor laser system, while the Ansys Fluent software package was used to perform the numerical simulations. A comparison of the results showed a good agreement between the particle size distribution obtained in the experiment and in the numerical simulation.

Scientific sciences:  
Natural sciences and  
technology

Keywords:

Experimental  
Spray  
Characterization,  
Particles  
size  
distribution,  
Computer  
fluid  
dynamic,  
Spray  
drying,  
Secondary  
break  
up

## 1 Uvod

Sušenje vlažnih snovi predstavlja eno izmed najstarejših in tudi najpogostejših procesnih tehnik, ki se uporablja na širokem področju industrije, kot je na primer prehrambena, kemijska in farmacevtska industrija. Pri sušenju obravnavamo izredno zapletene fizikalne procese, ki obsegajo vezan večfazni prenos toplote, snovi in gibalne količine. Zaradi tega ostaja sušenje še dandanes zelo zahtevno in zanimivo raziskovalno področje, kjer se močno prepletajo praktične izkušnje, eksperimenti in numerično modeliranje.

Pogosto se v prej imenovanih panogah pojavlja oblika razpršilnega sušenja, kjer suspenzije, ki smo jih razvijali v tekoči fazi, spremenimo v trdno fazo, ki omogoča lažjo manipulacijo, skladiščenje in obstojnost. Razprševanje suspenzije v večini poteka na dva načina in sicer, z rotacijskim atomizerjem ali z razpršilno šobo. Sam proces razpršilnega sušenja lahko razdelimo na tri pomembne sklope in sicer, tokovne razmere v sušilniku, proces sušenja in formiranje spreja.

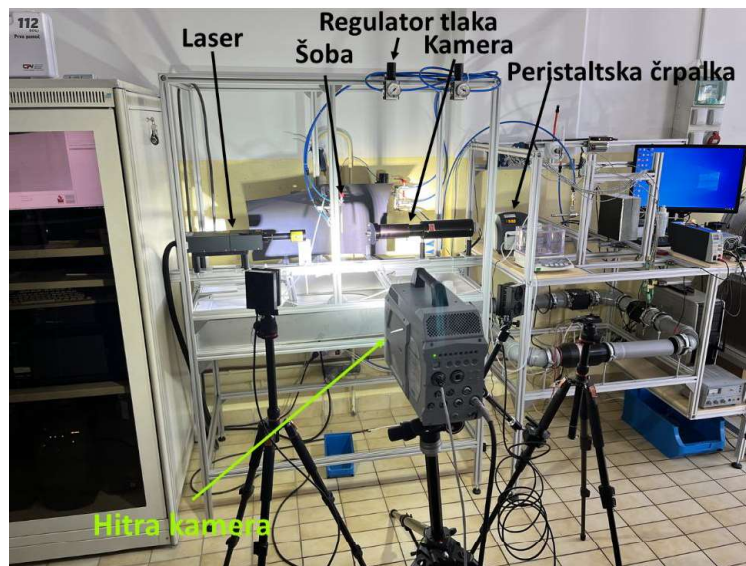
Različni avtorji so skozi zgodovino predstavili pomembna spoznanja in dosežke na področju modeliranja razpršilnega sušenja. Avtor Fletcher (Fletcher in ostali, 2006) in sodelavci so v svojem prispevku predstavili ključna spoznanja pri izvedbi tridimenzionalnih izračunov razpršilnega sušenja in interakcije s steno, pri preučevanju stabilnosti toka in odlaganja delcev. Avtor Ramachandran (2018) je skupaj s sodelavci objavil pregledni članek, kjer navaja modele posameznih CFD paketov in možnosti njihove uporabe pri simulaciji procesa razpršilnega sušenja. Pregled zajema tudi analizo matematičnih pristopov, uporabljenih v modelih sušenja in turbulentne modele, ki se uporabljajo pri teh simulacijah. Avtor Tavangar (2015) s sodelavci je v svoji študiji preučeval dinamično obnašanje kapljic brozge iz premoga in vode med sekundarnim razpadom. V numerični analizi je bila uporabljena sklopljena tehnika, vključno s simulacijo LES in VOF z dinamično prilagodljivo mrežo. Rezultati so pokazali dobre napovedi za sekundarni razpad na osnovi CFD simulacij. Sekundarni razpad delcev je bila tudi tema raziskave, ki jo je predstavil avtor Berni s sodelavci (Berni in ostali, 2022). Problematiko so obravnavali na motorjih z direktnim vbrizgom bencina, kjer ima sekundarni razpad pomembno vlogo pri mešanju zraka in goriva. Najbolj razširjena modela sekundarnega razpada delcev, v primeru obravnave motorjev z notranjim izgorevanjem sta Reitz-

Diwakarjev in Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylorjev model, ki dajeta dobre rezultate. Avtor Schmehl s sodelavci (2000) je predstavil rezultate raziskave sekundarnega razpada na primeru dvofaznega toka v mešalni pred zgorevalni komori, kjer je bila uporabljena Lagrangevo metodo sledenja kapljic. Za razprševanje suspenzije je bila uporabljena tlačno-vrtinčna šoba.

V danem prispevku je obravnavan razpršilni sušilnik, v katerem za razprševanje suspenzije uporabljamo zračno šobo. Poleg zraka na šobi, ki skrbi za razpad delcev se v komoro dovaja sušilni zrak, ki ima funkcijo sušenja kapljic suspenzije. Karakterizacijo šobe in s tem določitev vhodnih parametrov za izvedbo računalniških simulacij smo izvedli s sistemom Oxford laser.

## 2 Numerični model razpršilnega sušilnika

Numerični model in eksperimentalne analize prikazane v nadaljevanju so bile izvedene na osnovi pilotnega razpršilnega sušilnika podjetja RCPE GmbH Graz in merilne opreme proizvajalca Oxford Laser, za karakterizacijo velikosti delcev v spreju (Slika 1), ki pripada Fakulteti za strojništvo Maribor.

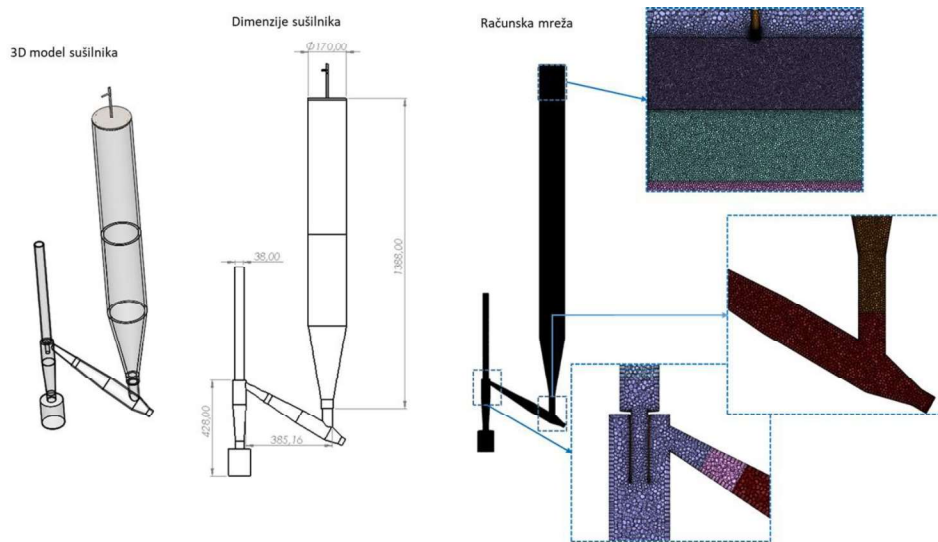


Slika 1: Laboratorijsko postrojenje za karakterizacijo spreja.

Vir: lasten

## 2.1 Geometrija in računska mreža

Razpršilni sušilnik je sestavljen iz osnovne cilindrične komore, v katero na vrhu priteka sušilni plin in suspenzija. Suspenzija se dovaja skozi šobo, kjer poleg toka suspenzije poteka tudi tok formirnega zraka, ki povzroča primarni in sekundarni razpad curka v kapljice. V odvisnosti od pretoka suspenzije in trdnih delcev, ki jih le-ta vsebuje lahko na šobi zamenjujemo dozirno glavo, kjer imamo na voljo odprtine od 0,1 mm do 1.2 mm.



Slika 2: Geometrija razpršilnega sušilnika z osnovnimi dimenzijami in računska mreža.

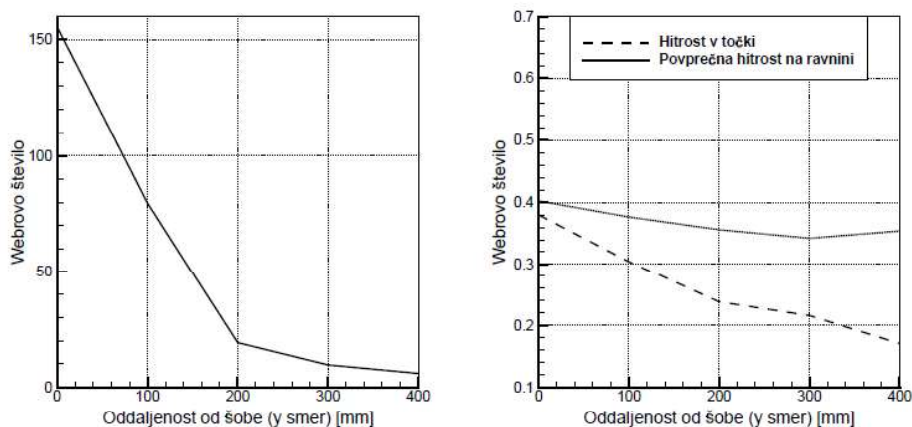
Vir: lasten

Osnovna komora razpršilnega sušilnika je visoka 1380 mm in se s konusom izteka v prehodni konus, ki je glede na komoro postavljena pod kotom  $60^\circ$ . Na koncu prehodnega konusa je nameščen ciklon, ki skrbi za separacijo suhih delcev iz zraka, ki se izteka na vrhu ciklona. Celotna sušilna komora je izdelana iz stekla debeline 5 mm.

## 2.2 Matematično fizikalno ozadje

V primeru razpršilnega sušilnika smo kot sušilni plin uporabljali vroč zrak, ki predstavlja zvezno fazo. Suspenzija je bila v sušilno komoro dovajana na način naključnega formiranja kapljic enake velikosti z enake začetne točke, v kotu razprševanja med  $0^\circ$  in  $30^\circ$  in v krogu  $360^\circ$  okrog točke, kar predstavlja razprševanje v obliki polnega stožca in ustreza profilu uporabljene šobe. Kapljice suspenzije smo obravnavali kot Lagrangeve. Pri formiranju spreja smo uporabili sekundarni model razpada delcev.

Modeliranje sekundarnega razpada delcev opisujejo različni modeli. Pri izbiri le-tega si pogosto pomagamo z Weberjevim številom, ki je karakteristično število in kot brezdimenzijska količina opisuje razmerje med deformirajočimi vztrajnostnimi silami in stabilizacijskimi kohezivnimi silami za tekočine, ki se premikajo skozi drugo tekočino (npr. kapljica skozi zrak). Na grafih na sliki 3 je prikazano stanje Weberjevega števila v razpršilnem sušilniku v različnih točkah. Graf na levi strani prikazuje vrednosti Weberjevega števila v centru toka formirnega zraka od šobe do razdalje 400 mm od šobe.



Slika 3: Vrednosti Weberjevega števila na različnih območjih v delu formacije spreja v razpršilnem sušilniku.

Vir: lasten

Graf na desni strani pa prikazuje vrednosti Weberjevega števila v točkah, ki so nekoliko zamaknjene od glavnine toka formirnega zraka in glede na povprečne hitrosti na ravninah v razpršilnem sušilniku, ki so prikazane na sliki 4. Vidimo lahko, da vrednosti Weberjevega števila nihajo med 155 in 0,18.

Na osnovi Weberjevega števila, smo se odločili za uporabo dveh različnih modelov, in sicer Wave modela, ki je primeren za visoko hitrostno injektiranje, kjer se domneva, da pri razpadu kapljic prevladuje Kelvin-Helmholtzova nestabilnost ( $We > 100$ ) (Reitz, 1986). Model najbolj ustreza v centralnem curku formirnega zraka, medtem ko je za opis sekundarnega razpada v celotnem območju razpršilnega sušilnika, kjer velja, da je vrednost Weberjevega števila med  $0.18 < We < 155$ , bolj primeren model KHRT, ki združuje učinke Kelvin-Helmholtzove nestabilnosti in TAB modela, ki temelji na Rayleigh-Taylorjevi analogiji.

Pri modelu Wave razpad parcel kapljic izračunamo na osnovi predpostavke, da je polmer novonastalih kapljic sorazmeren valovni dolžini najhitreje rastočega nestabilnega površinskega vala na matični kapljici. Razmerje podamo z enačbo:

$$r = B_0 A$$

kjer je  $B_0$  konstanta, ki je v osnovi enaka 0,61 (Reitz, 1987). Hitrost spremembe polmera kapljice v matični parceli podamo z:

$$\frac{da}{dt} = -\frac{(a-r)}{\tau}, r \leq a.$$

Čas razpada delca  $\tau$  podamo kot:

$$\tau = \frac{3,726 B_1 a}{A \Omega}$$

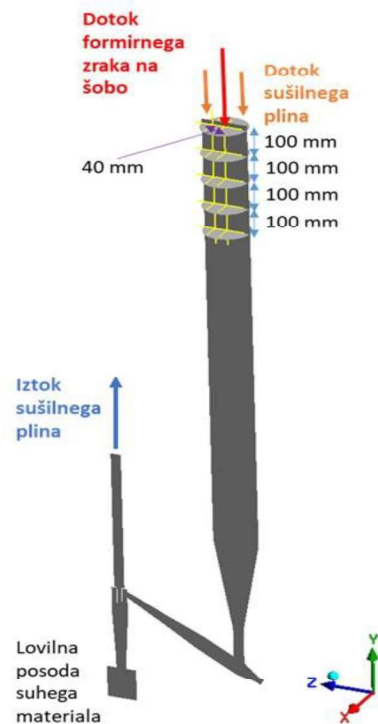
Časovna konstanta razpada delcev  $B_1$  je v osnovi enaka 1,73, njen razpon pa je možen med 0 in 60 (Liu, Mather in Reitz, 1993). Vrednost maksimalne rasti  $\Omega$  in pripadajoči dolžino rastočega vala  $A$  določimo iz Reity-ove odvisnosti:

$$\frac{A}{a} = 9,02 \frac{(1 + 0,45 Oh^{0,5}) (1 + 0,4 Ta^{0,7})}{(1 + 0,87 We_2^{1,67})}$$
$$\Omega \sqrt{\frac{\rho_1 a^3}{\sigma}} = \frac{0,34 + 0,38 We_2^{1,5}}{(1 + Oh)(1 + 1,4 Ta^{0,6})}$$

kjer Ohnesorgevo število izračunamo kot  $Oh = \sqrt{We_1/Re_1}$  in Taylorjevo število pa kot  $Ta = Oh \sqrt{We_2}$ . Weberjevo število je definirano k (Ramachandran in ostali, 2018) ot  $We_1 = \rho_1 U^2 a / \sigma$  in  $We_2 = \rho_2 U^2 a / \sigma$  ter Reynoldsovo število kot  $Re_1 = Ua/v_1$

### 2.3 Robni pogoji

Robni pogoji za izvedbo numeričnih simulacij so bili enaki, kot so bili robni pogoji pri eksperimentu in so prikazani v tabeli na sliki 5 . V primeru trka delca s steno sušilnika je bil predpisan robni pogoj odboja delca, pod enakim kotom, kot je bil kot prileta v steno. Za namene prispevka smo uporabili eksperimentalne vrednosti meritve številka 1 v tabeli na sliki 5 (Ramachandran in ostali, 2018).



Slika 4: Prikaz robnih pogojev na razpršilnem sušilniku ter ravnin in točk za prikaz rezultatov.

Vir: lasten



Meritev	Šoba [mm]	T <sub>in</sub> [°C]	Zrak sušilnik [m <sup>3</sup> /min]	T <sub>out</sub> [°C]	Pretok suspenzije [g/min]	Zrak šoba [l/min] (0.59 ± 0.01 bar)	T zrak iztok [°C]	Tlak ciklon [mBar]
1	1.2	97.50 ± 0.23	0.65 ± 0.02	67.29 ± 0.77	1.57 ± 0.10	19.22 ± 0.08 (0.59 ± 0.01 bar)	57.10 ± 0.68	55.55 ± 1.06
2	1.2	117.46 ± 0.87	0.46 ± 0.01	60.71 ± 1.12	1.88 ± 0.08	19.57 ± 0.07 (0.59 ± 0.00 bar)	59.41 ± 1.01	59.41 ± 1.02
3	1.2	117.27 ± 0.50	0.48 ± 0.01	61.44 ± 1.22	1.89 ± 0.26	19.22 ± 0.07 (0.59 ± 0.00 bar)	65.51 ± 1.35	60.50 ± 1.11
4	1.2	137.96 ± 0.24	0.23 ± 0.01	40.20 ± 0.48	1.82 ± 0.14	19.24 ± 0.06 (0.61 ± 0.01 bar)	55.11 ± 0.51	55.58 ± 1.04
5	1.2	136.26 ± 0.37	0.57 ± 0.01	85.27 ± 1.65	1.80 ± 0.09	19.00 ± 0.06 (0.59 ± 0.00 bar)	59.97 ± 1.60	57.73 ± 0.64
6	1.2	98.78 ± 0.19	0.22 ± 0.02	34.93 ± 1.12	1.60 ± 0.20	19.00 ± 0.09 (0.59 ± 0.00 bar)	37.03 ± 1.28	52.99 ± 2.00

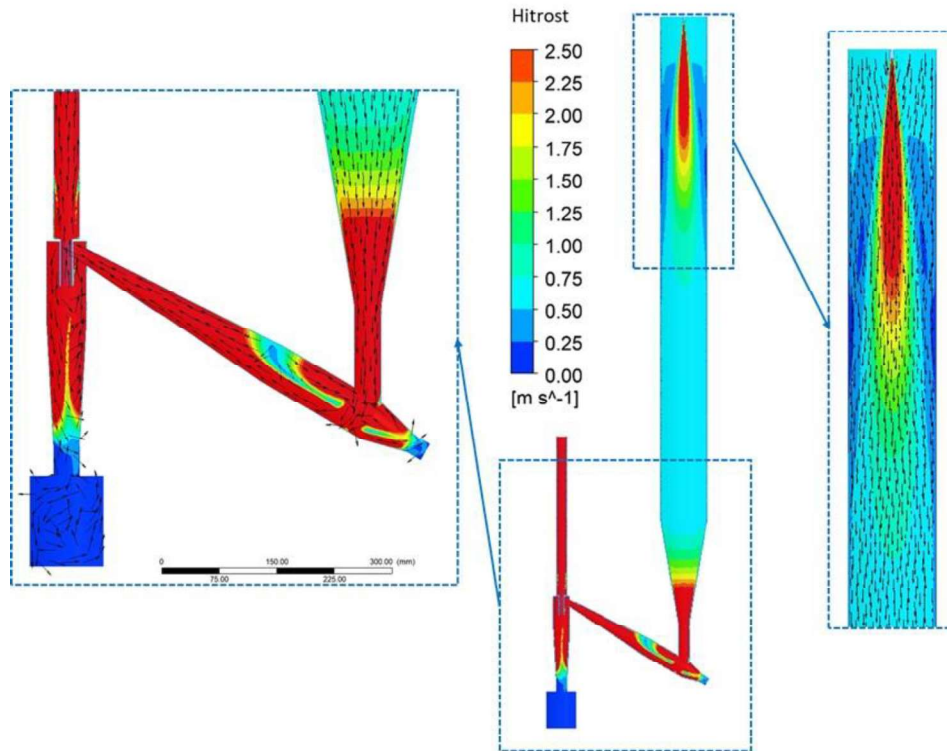
Slika 5: Procesni pogoji in vrednosti merjenih parametrov pri izvajanju eksperimenta.

Vir: lasten

### 3 Rezultati

Na vstopu v sušilnik, sta bila predpisana dva masna pretoka zraka in sicer pretok formirnega zraka na šobi, katerega pretok znaša 19,22 l/min in sušilnega zraka v komoro, ki se steka preko celotne zgornje površine sušilnega stolpa in znaša 0,65 m<sup>3</sup>/min. Na izstopu iz ciklona je predpisan tlak 0 bar. Za izvedbo numerične simulacije je bil uporabljen k-epsilon turbulentni model.

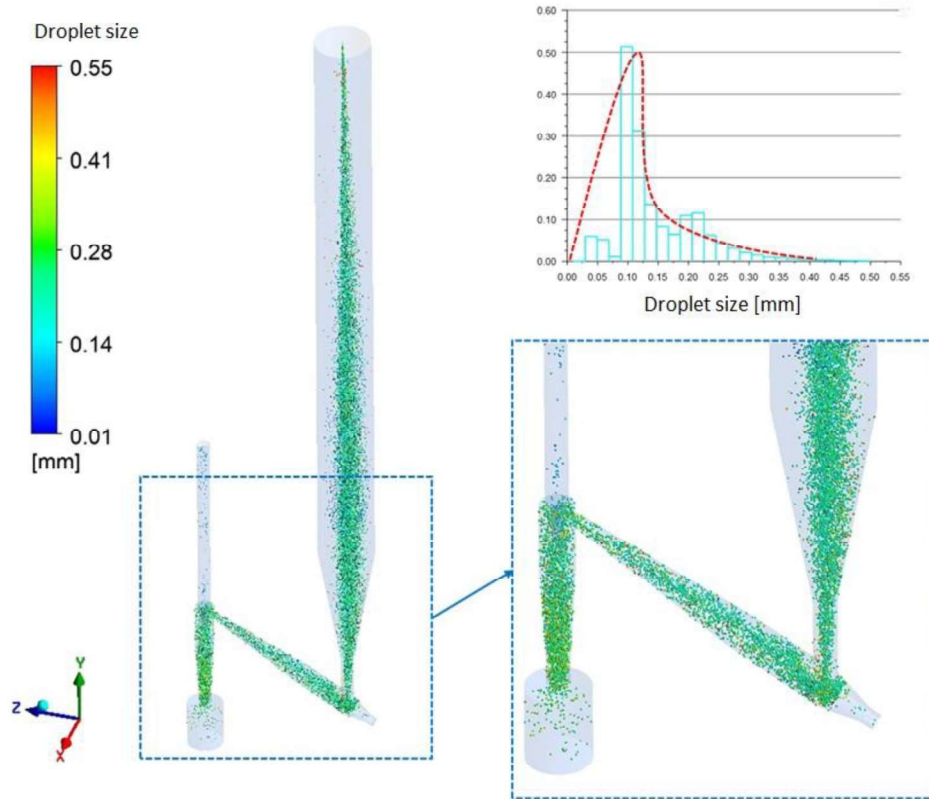
Na osnovi predpisanih robnih pogojev se v sušilniku razvije tokovno polje, ki je prikazano na sliki 6.



**Slika 6: Hitrostno polje v razpršilnem sušilniku s prikazom vektorjev na območju formiranja spreja in prehodnega konusa ter ciklona.**

Vir: lasten

Vidimo lahko, da formirni zrak na šobi povzroči lokalno območje povečane hitrosti zraka v zgornjem delu sušilnega stopila kjer prihaja do formiranja spreja. Do povečanega vrtinčenja zraka prihaja na izhodu iz sušilnega stolpa in na prehodu v prehodni konus, saj prihaja do ostre spremembe sredi toka. Do podobnega stanja pride v ciklonu, kjer pa je zaradi tega dosežena funkcija ločevanja suhih delcev iz toka sušilnega plina. Le-ti zaradi svoje mase končajo na stenah ciklona in padejo v lovilno posodo. Le redki osušeni delci, ki predstavljajo najmanjše delce glede na velikostno razporeditev, uspejo ciklon zapustiti skupaj s sušilnim plinom.



Slika 7: Prikaz delcev v razpršilnem sušilniku z velikostno razporeditvijo delcev.

Vir: lasten

Nastanek spreja in potovanje delcev skozi sušilnik nam prikazuje slika 7. V začetni fazi nastajanja spreja se tvorijo večje kapljice, ki zapuščajo območje šobe. Kot izhaja iz prikaza tokovnega polja, se novo nastale kapljice znajdejo na področji različnih hitrosti znotraj sušilnika. Pri tem na njih delujejo različno velike sile in posledično prihaja do razpada oziroma tvorjenja manjših kapljic iz začetnih velikih kapljic. Za kalibracijo numeričnega modela so bile opravljene meritve šob na sistemu Oxford laser, ki omogoča merjenje velikosti kapljic, delcev in mehurčkov, karakterizacijo oblike spreja prek kvantifikacije vzorca spreja in geometrije spreja. Porazdelitev delcev, ki nastanejo pri razprševanju, ima vrh pri kapljicah velikosti 0,1 mm, kar je prikazano na grafu na sliki 7. Modri histogram prikazuje velikostno porazdelitev

numerične simulacije, medtem ko rdeča črta prikazuje stanje eksperimentalne meritve na šobi z nazivno velikostjo 1,2mm.

#### 4 Zaključek

Modeliranje procesa razpršilnega sušenja je kompleksen proces. Za izračun pravilne kinetike sušenja delcev in posledično določitev časov, ki so potrebni za uspešno sušenje kapljic suspenzije, ki jo dovajamo v sušilno komoro, je potrebno doseči natančno porazdelitev velikostnih razredov delcev, ki prihajajo iz šobe. Merilni sistem Oxford laser nam omogoča meritve za karakterizacijo spreja, na osnovi česar pridemo do nujnih vhodnih podatkov za numerične simulacije. Tako smo dosegli primerljivo porazdelitev delcev med eksperimentom in simulacijo. V nadaljnjem delu bomo numerični model nadgradili z dvostopenjskim modelom sušenja delcev, ki poleg sušenja površinske vlage zajema še sušenje notranjost delca.

#### Literatura

- Berni, F., Sparacino, S., Riccardi, M., Cavicchi, A., Postriotti, L., Borghi, M. in Fontanesi, S. (2022). A zonal secondary break-up model for 3d-cfd simulations of gdi sprays. *Fuel*, 309:122064.
- Fletcher, D., Guo, B., Harvie, B., Langrish, T., Nijdam J. in Williams, J. (2006). What is important in the simulation of spray dryer performance and how do current cfd models perform? *Applied mathematical modelling*, 30(11):1281–1292.
- Liu, B., Mather, D. in Reitz, R. D. (1993). Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays. *SAE Transactions*, pages 83–95.
- Ramachandran, R. P., Akbarzadeh, M., Paliwal, J. in Cenkowski, S. (2018). Computational fluid dynamics in drying process modelling—a technical review. *Food and bioprocess technology*, 11(2):271–292.
- Reitz, R. D. (1987). Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays. *Atomisation Spray Technology*, 3(4):309–337.
- Reitz, R. D. (1986). Mechanism of breakup of round liquid jets. *Encyclopedia of fluid mechanics*, 10.
- Schmehl, R., Maier, G. in Wittig, S. (2000). Cfd analysis of fuel atomization, secondary droplet breakup and spray dispersion in the premix duct of a lpp combustor. In *ICLASS 2000: 8th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Pasadena, CA, USA, 16-20 July 2000.
- Tavangar, S., Hashemabadi, S. H. in Saberimoghdam, A. (2015). Cfd simulation for secondary breakup of coal–water slurry drops using openfoam. *Fuel Processing Technology*, 132:153–163.