# E. Znanstvena, tehnološka oziroma inovacijska odličnost

## 33. Predstavitev raziskovalnega programa P2-0196 za ocenjevanje prijave po kriteriju »Znanstvena, tehnološka oziroma inovacijska odličnost«

### Opis predlagane vsebine glede na stanje na področju predlaganih raziskav

Analiza, razvoj in optimizacija inženirskih sistemov na področju energetskega, procesnega in okoljskega inženirstva so lahko uspešni le, če so temeljni fizikalni pojavi v strojih in napravah dobro razumljeni. Hkrati je potrebno razviti in redno izboljševati učinkovite in inovativne numerične metode v kombinaciji z eksperimentalnimi metodami. Na tem področju raziskav so prenosni pojavi v tekočinah in trdnih snoveh s poudarkom na večkomponentnih večfaznih reaktivnih tokovih glavni eksperimentalni in simulacijski izziv. Temeljna znanstveno-teoretična načela predlaganega raziskovalnega programa so torej transportni pojavi v trdnih snoveh in tekočinah, to je prenos gibalne količine, toplote in mase v razmerah pretežno turbulentnega toka tekočine. Med raziskovalnimi tehnikami za raziskovanje teh pojavov je računalniška dinamika tekočin (CFD) postala nepogrešljivo znanstveno in inženirsko orodje, ki omogoča natančnejši vpogled v prostorske in časovne značilnosti procesov. Uporaba CFD metod za natančno izračunavanje transportnih pojavov v večfaznih in reaktivnih večkomponentnih tokovih je močno odvisna od uporabljenih modelov. Modeli opisujejo fizikalne pojave, ki jih danes še ne moremo uspešno izpeljati iz ohranitvenih načel. Uporabnost takšnih modelov je odvisna od številnih parametrov. Specifičnih modelov ni mogoče posploševati, ampak jih je potrebno do neke mere prilagoditi posameznim vrstam prenosnih pojavov in obsegu delovnih pogojev strojev in naprav. Razvoj specifičnih računalniških modelov se običajno opira na osnovni algoritem, tj. CFD računsko kodo v primeru prenosnih pojavov v tekočinah in trdnih snoveh. Velik del inženirskega načrtovanja poteka ob podpori komercialne CFD opreme, ki vključuje vnaprej določene fizikalne modele. Za doseganje najvišjega nivoja razvoja in raziskav pa je potrebno izboljšanje obstoječih modelov ali pa razvoj novih modelov. V predlaganem raziskovalnem programu razvoj novih modelov potekal na ravni komercialnih paketov (Ansys CFX / Fluent, AVL Fire), na ravni odprtokodnih paketov (OpenFOAM) in na ravni lastnih, doma razvitih računalniških CFD orodij. Ti bodo osnovani na izpeljankah metode robnih elementov (BEM). Ker predlagani raziskovalni program sestoji iz treh glavnih inženirskih aplikacijskih področij in področja razvoja ciljnih inovativnih računalniških orodij na podlagi BEM, je v nadaljevanju kratek opis stanja na izbranih raziskovalnih področjih glede na raziskovalne cilje predlaganega programa.

Metoda Robnih Elementov (BEM) [1] je zmogljivo orodje za reševanje parcialnih diferencialnih enačb (PDE). Temelji na uporabi drugega Greenovega teorema in na poznavanju fundamentalne rešitve fizikalnega problema. S tem zapišemo integralsko obliko enačbe, ki je odvisna izključno od neznank na robu območja obravnave – in sicer funkcije in njenega normalnega odvoda. Tako za rešitev BEM potrebuje samo diskretizacijo robu in ne območja. Največja slabost metode je dejstvo, da so matrike v končnem zapisu sistema linearnih enačb polno zasedene in nesimetrične. Predlaganih je bilo več metod, s katerimi poskušamo pospešiti reševanje polno zasedenih sistemov enačb [2, 3], kot na primer panel clustering metoda, fast multipole metoda, valčna transformacija, adaptive cross-approximation (ACA), in hierarhične $\mathcal{H}$ matrike. Vsi ti pristopi zmanjšujejo računsko in spominsko zahtevnost metode iz $O(n^2)$ na $O(n \log n)$ ali $O(n)$. Zaradi naraščajočih potreb po časovno odvisnih simulacijah se še vedno trudimo najti izboljšave teh metod. Predlagani raziskovalni program se bo ukvarjal z računsko analizo disperznih večfaznih tokov s točkovno aproksimacijo izvorov. Za tak model uporaba BEM predstavlja veliko prednost pred uveljavljenimi pristopi [4–6]. Ti namreč izmenjavo gibalne količine in energije med disperzno in zvezno fazo modelirajo s pomočjo približka Diracove delta funkcije. BEM pa za opis tokovnih izvorov ponuja numerično stabilen in točen pristop. Izmenjava veličin se zapiše kot vsota dodatnih členov, ki so posledica analitičnega izračuna območnih integralov. Aproksimacije niso potrebne.

Redki disperzni dvofazni tokovi, kjer medsebojni vpliv med disperzno in zvezno fazo lahko opišemo s točkovnim približkom, so pogosto prisotni v procesnem, energetskem in okoljskem inženirstvu. Navadno imamo opravka s trdnimi delci velikosti mikrona, ki so razpršeni v zvezni tekočinski fazi. Obnašanje delcev v toku modeliramo z Euler-Lagrange pristopom, ki obravnava tekočino kot zvezno in posamezne delce sledi po toku in hkrati upošteva interakcijo med tekočino in delci. Delci so lahko različnih velikosti, oblik in gostot in zahtevajo pravilno obravnavo izmenjave veličin na relaciji tekočina – delec.

Na podlagi predhodnih raziskav [21, 22] se je pokazalo, da ima dodajanje nanodelcev čisti tekočini pozitivni vpliv na toplotne lastnosti nastale nanotekočine [40]. Ta lahko bistveno izboljša učinkovitost mnogih tehnoloških procesov na področju procesnega inženirstva. Doslej opravljene študije temeljijo na uporabi matematičnega modela, kjer je nanotekočina opisana kot enofazna tekočina z efektivnimi lastnostmi. Tak model je primeren za obvladovanje suspenzij, pri katerih koncentracije nanodelcev niso višje od 5%. Pri višjih koncentracijah nanodelcev je mešanico potrebno obravnavati kot dvofazno tekočino in hkrati modelirati interakcijo med tekočo in trdno fazo [18, 19]. Poleg razredčenih večfaznih tokov se v številnih procesih pojavljajo tudi tokovi gostih suspenzij. Na primer, v farmacevtski industriji obstaja potreba po optimizaciji postopka oblaganja tablet z mešanjem tablet v rotirajočem bobnu, raztapljanje tekočega medija in hkratno sušenje s pretokom zraka [41]. Ker so tablete obložene z suspenzijo v rotirajočem bobnu, pri čemer topilo izhlapi s površine tablet v stiku z ogrevalnim zrakom, je potrebno točno simulirati medsebojni vpliv med delci in tekočino. V zadnjem času pri reševanju problemov te vrste uporabljamo Discrete Element Method, ki so sklopimo z računsko dinamiko tekočin [42]. Tak pristop je relativno nov in še vedno je odprtih veliko vprašanj glede pravilnega modeliranja interakcij med delci in tekočino. Večina modelov, ki so na voljo, velja za primer obravnave posameznih delcev v tekočini.

V zadnjih letih se raziskave prenosa toplote v bioloških sistemih, kot je človeško tkivo, uporabljajo kot osnova za razvoj novih diagnostičnih metod. Te temeljijo na računalniških modelih in eksperimentalnih podatkih za ugotavljanje nenormalnosti v telesu ali opazovanem tkivu. Nove metode temeljijo na določanju porazdelitve temperature v opazovanem tkivu, ki je neposredno povezana s fiziološkimi ali patološkimi spremembami, ki so vzrok za spremembe v izmerjeni temperaturi. Z razvojem termografskih kamer in numeričnih metod je termografija v zadnjem času postala zanimiva neinvazivna tehnika za različne medicinske aplikacije, kot so diagnostika raka dojk, vaskularne bolezni, diagnostika v zobozdravstvu, kožne bolezni, spremljanje krvnega tlaka itd. [23, 24]. Avtorji termografijo uporaljajo v statičnih in dinamičnih eksperimentih. Dinamična meritev ima bistveno več prednosti kot statična, kar pomeni, da postaja pomemben ne le za znanstvene raziskave, ampak tudi za praktično uporabo. V dinamični termografiji opazovano tkivo stimuliramo z ogrevanjem ali hlajenjem za določeno časovno obdobje, pri čemer se zabeleži temperaturni odziv, ki daje bolj dragocene informacije o opazovanem odzivu tkiva, kot zgolj statična porazdelitev temperature [25–28]. Zabeleženi temperaturni odziv je mogoče uporabiti za določitev pomembnih parametrov iz medicinskega vidika, kot so velikost prizadetega območja, invazivnost, globina itd. Raziskave na tem področju lahko razširimo na problematiko prezračevanja in klimatizacije s poudarkom na faktorjih udobja [30], saj imajo termični pogoji v zaprtih prostorih (pisarne, stanovanja itd.) neposreden vpliv na pretok krvi skozi tkivo in njegove odzive na zunanje dražljaje. To bi lahko privedlo do naprednih računalniških modelov toplotnega ugodja, ki upoštevajo aktivni odziv uporabnikov.

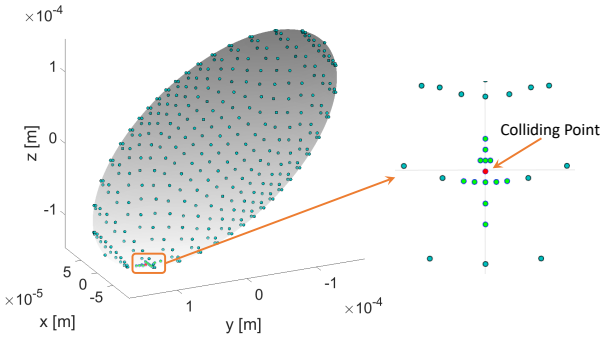
Kljub naglemu razvoju sodobnih električnih vozil, je po mnenju strokovnjakov vozilo z motorjem z notranjim izgorevanjem, ki uporablja sodobne sisteme za obdelavo izpušnih plinov, veliko bolj ugodno za ogljični odtis kot električno vozilo. Zato je še vedno smiselno nadalje razvijati motorje z notranjim izgorevanjem. Tako motorje s prisilnim vžigom kot tudi motorje z lastnim vžigom, saj se njihove sodobne emisijske lastnosti ne razlikujejo bistveno. V tem pogledu imajo hibridna goriva, ki se uporabljajo v kombinaciji električnih motorjev in motorjev z notranjim zgorevanjem, pomembno vlogo pri zmanjševanju onesnaževanja okolja, saj imajo velik vpliv na zmanjšanje emisij v mestih [34]. Da bi optimizirali delovanje hibridnih vozil in zmanjšali njihov vpliv na okolje, je nadaljnji napredek pri razvoju motorjev z notranjim zgorevanjem še vedno nepogrešljiv in lahko dodatno prispeva k zmanjšanju emisij. Pomembno je tudi poudariti velik potencial motorjev z notranjim zgorevanjem za energetsko rabo biomase in odpadnih materialov [36]. Njihova pomembna prednost pred drugimi metodami zgorevanja je visoka toplotna učinkovitost v širokem razponu moči, ki zagotavlja visoko fleksibilnost uporabe in učinkovito uporabo v okviru racionalne rabe alternativnih virov energije. V slednjem pogledu je zgorevanje trdnih goriv na rešetki z ločenim dovodom zraka ali goriva metoda, s katero se lahko učinkovito zmanjša proizvodnja onesnaževal, ki je posledica popolnega in nepopolnega zgorevanja. Učinkovitost takih sistemov je odvisna od procesnih in geometrijskih parametrov [49]. Takšni sistemi zgorevanja predstavljajo kompleksen vpliv geometrijskih in procesnih parametrov na nastanek onesnaževalcev [51], ki še ni bil dovolj raziskan. Numerično modeliranje je učinkovito orodje za analizo takšnih sistemov, saj omogoča hitro prilagajanje geometrijskih in procesnih parametrov, kar omogoča parametrične študije in določanje vplivnih parametrov na proces zgorevanja [31, 50].

V turbinskih strojih se problem kavitacije pojavlja v številnih primerih, tako v prostoru kot v času pri različnih operativnih režimih. Danes velja, da je nastanek škode posledica več dogodkov, pri čemer je kolaps parne faze navdano navajan kot kritični dogodek. Na splošno velja, da kolaps kavitacijskega oblaka povzroča udarni val, ki je v interakciji z enojnimi kavitacijskimi mehurčki, ki so prisotni v bližini stene [43] in povzroča poškodbe. Odprta

so naslednja splošna vprašanja: kako natančno pride do kolapsa kavitacijske strukture, kako ustvarjen tlačni impulz sproži erozijo in kako se razvija poškodba. Stanje na področju raziskav CFD [44, 45] je osredotočeno na modele za napovedovanje kavitacijske erozije. V [48] so avtorji proučevali kavitacijo v Peltonovi in ugotovili, da kavitacija povzroči erozijo materiala le, če je para pritrjena na lopatico turbine in je proces kondenzacije zelo hiter brez prisotnosti zraka.

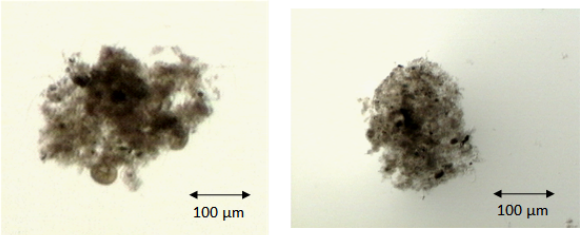
**Cilji raziskave s poudarkom na izvirnosti predlaganih raziskav ter njihovim potencialnim vplivom na razvoj novih raziskovalnih smeri**

Kot **cilj 1** smo si zadali raziskave na področju **naprednih numeričnih modelov za simulacijo dvofaznih tokov**. Razvijali in uporabljali bomo nove interakcijske modele za numerično simulacijo razredčenih razpršenih dvofaznih tokov z Lagrange-Eulerjevim pristopom. Prvi del bo namenjen naprednemu ovrednotenju novega modela vzgona [9, 10] s pomočjo direktne numerične simulacije in izboljšanju Stokesovega modela sile upora na elipsoidnih delcih. Osredotočili se bomo na primer visokih Knudsenovih števil, ko hipoteza kontinuuma odpove. Kot cilj smo si zadali tudi napredno uporabo razvitih modelov, na primer, tokov v ozkih kanalih (pljuča). Pričakujemo, da bo prišlo do interakcije s steno in regijami z višjimi gostotami delcev. Preučili bomo interakcijo s steno in obravnavo razširili na trke med ne-sferičnimi delci. Zaradi anizotropne oblike mora model za odlaganje ne-sferičnih delcev na steni natančno zaznati točko trka med delcem in steno, za kar nameravamo razviti računalniško učinkovit algoritem z uporabo postopka večstopenjske zgostitve mreže sl. 1. Nadalje bomo izračunali silo oprijema in silo upora, ki delujeta na delce med trkom. V sodelovanju s prof. Steinmannom iz Univerze v Erlangen-Nurembergu, Nemčija bomo nadaljevali razvoj modela Cui & Sommerfeld [11] in ga uporabljali za primer ne-sferničnih delcev in sten s tankim slojem tekočine (primer: pljuča). Ker lahko pride do trka med delci, bomo model trka razvili tudi za ta primer. Obravnavani bodo delci elipsoidne oblike (vlakna).




Slika 1: Illustration for the use of multi-level grid refinement to determine the colliding point between a prolate spheroidal particle and a plane wall ($a = 100\,\mu m$, $\lambda = 2$, Euler angle= $[0,\ 52°,\ 0]^T$, three refinement levels are applied).

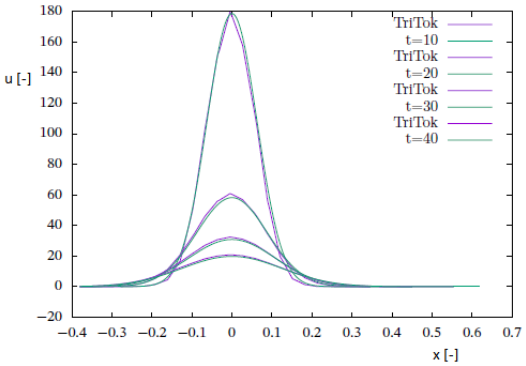
Poleg tega bomo uporabili nov model sile za interakcijo med delci in tekočino na primeru poroznega prepustnega elipsoidnega delca z nehomogeno porazdelitvijo mase (primer blata, sl. 2 Raziskali bom tudi dinamiko ne-sfernih mikro delcev, ki nastajajo v procesnem in okoljskem inženirstvu. Na primer, v sekundarni fazi čiščenja odpadne vode uporabljamo sedimentacijo ne-sfernih poroznih delcev z nehomogeno porazdelitvijo mase. Do posedanja aktivne biomase prihaja tudi v bioreaktorjih. Raziskali bomo tudi dinamiko transporta in odlaganja mikro steklenih vlaken, ki se pojavljajo pri dovajanju zdravil v človeške dihalne poti.




Slika 2: Posnetek blata iz komunalne čistilne naprave.

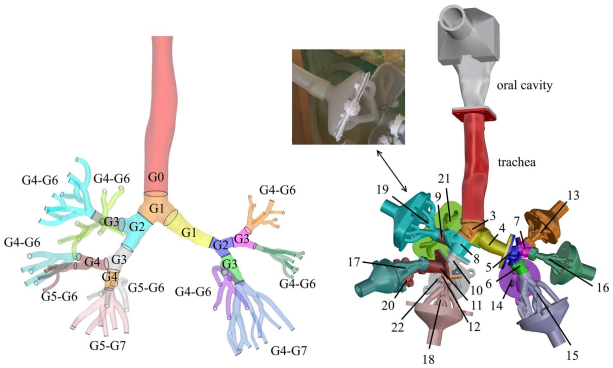
V mnogih industrijskih in okoljskih primerih je velikost obravnavanih delcev zelo majhna. To lahko pripelje do primera, kjer hipoteza kontinuuma, na kateri izhajajo vodilne enačbe gibanja tekočin, ni več v celoti veljavna. V takih primerih model Stokesove sile upora, ki temelji na predpostavki brez zdrsa tekočine na površini delcev, ni več točen. Tipična rešitev za modeliranje je popravljanje klasičnih modelov sile s Cunninghamovim korekcijskim faktorjem drsenja, ki omogoča pri izračunu upora na majhne delce natančnejši izračun. Ker bodo obravnavani delci v raziskovalnem delu ne-sferični, je potrebno preveriti pravilnost korekcijskega faktorja Cunninghamovega zdrsa, ki je bil razvit za krogle. Izvedli bomo direktno numerično simulacijo toka okoli elipsoidnega delca z uporabo robnih pogojev hitrosti zdrsa v obliki Maxwellovega modela. Uporabili bomo CFD pakete na osnovi končnih volumnov in na osnovi BEM. Glavna prednost uporabe BEM za simulacijo toka tekočine je edinstvena značilnost BEM algoritma, ki kot neznanko vključuje ne samo funkcijo ampak tudi njen normalni odvod. Ker Maxwellov model zdrsa temelji na tej veličini to omogoča učinkovito in natančno izračunavanje sile upora, ki deluje na delce, v pogojih višjih Knudsenovih števil in s tem izračun pravilne vrednosti Cunninghamove korekcije zdrsa za elipsoidne delce.

V okviru **cilja 2** bomo razvili **nov model izmenjave gibalne količine in energije med točkovnimi delci in zvezno tekočino** (Eulerjeva faza). Model bo uporaben za Euler-Lagrange simulacije večfaznih tokov. Razviti model bo močno poenostavil izvajanje dvosmerne sklopitve tekočina - delec, saj je izraz, ki ga dodamo zaradi učinka delcev, zgolj preprost člen, ki je obratno sorazmeren z razdaljo od mesta delcev do računskega vozlišča. Teoretično ta singularnost ne povzroča nikakršnih težav, vendar če se izvaja v računalniku z enojno ali dvojno natančnostjo, pride do napak pri zaokroževanju. Ko se delec približa vozlišču v računski mreži, velika vrednost izraza povzroči, da je numerični model nestabilen. Nazadnje se bodo ukvarjali tudi z povečevanjem učinkovitosti BEM algoritma. Uporabili bomo tehnike ACA in hierarhičnih matrik $\mathcal{H}$. Razvite modele in algoritme bomo validirali na več preskusnih primerih, vključno z ne-sferičnim prenosom delcev v direktni numerični simulaciji (DNS) toka v kanalu in sedimentacije poroznih kosov blata.



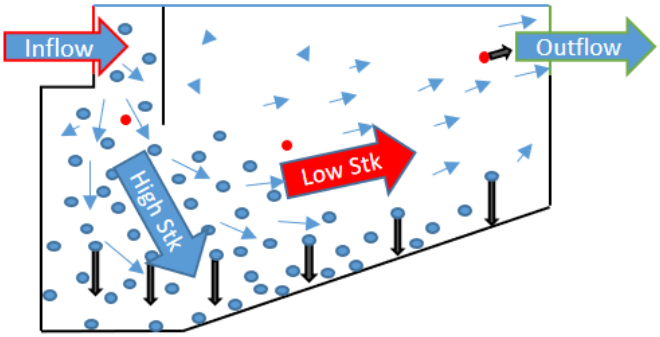

Slika 3: Prikaz porazdelitve temperature, ki je posledica hipnega točkovnega izvora. Primerjamo analitično vrednost in rezultat numerične simulacije z modelom sklopitve tekočine - delec.

V okviru **cilja 3** bomo preučevali **prenosne pojave z delci v procesnih tokovih**. Ti so pomembni pri razvoju številnih procesnih naprav, vključno z napravami, ki se uporabljajo v postopkih premazovanja in sušenja ter pri dostavi zdravil v pljuča. V dostavi zdravil v pljuča je pomembno razumeti kako na najučinkovitejši način dostaviti zdravilo na pravo mesto. Do sedaj je bila večina študij o prenosu in odlaganju delcev v dihalnih poteh človeka osredotočena na sferične delce ([14]), kljub temu, da je večina razpršenih sušenih aerosolnih zdravil ne-sferične oblike, ki jih lahko modeliramo v obliki sploščenih sferoidov ali vlaken. Obstaja le nekaj študij, ki so poročale o odlaganju vlaken v dihalnih poteh pri človeku, zato načrtujemo numerično simulacijo dihalnih poti za človeka in preverjanje dobljenih numeričnih rezultatov z eksperimentalnimi merjenimi podatki [7], da bi ugotovili natančen algoritem sledenja Lagrangeevih delcev za mikro delcev zdravil v človeške dihalne poti. Vzpostavili smo sodelovanje z dr. Lizalom in prof. Jicho s Tehnološkega univerze v Brnu na Češkem, ki sta izdelala realno repliko človeških dihalnih poti iz ustne votline v 7. generacijo bronhijev [15], kot je prikazano na sliki 4. Pri modeliranju sušenja bomo še dodatno izboljšali trifazni model sušenja z uvedbo BEM algoritma za prenos toplote in mase v notranjosti delca, kar bo imelo za posledico znižanje računske potrebe pršila in modela sušenja z vrtinčastim slojem. Na področju gostih tokov tekočinskih delcev je cilj raziskave izvedba in nadgradnja združene CFD-DEM numerične simulacije na podlagi komericalnega CFD paketa (AVL Fire, Ansys Fluent) in DEM paketa (EDEM), ki bodo sposobne natančne rešitve procesa oblaganja tabletnega bobna ([52]). Izvedena bo ciljna analiza vpliva procesnih parametrov na končno kakovost prevleke tablet in razvit celovit model za inženirski izračun učinkovitosti prevleke. Za namene validacije bo izdelana namenska laboratorijska naprava za premazovanje bobnov, ki se bo uporabljala za validacijo rezultatov simulacij




Slika 4: Geometrija modela pljuč in razdelitev na segmente na katerih so potekale meritve količine odlaganja delcev [7].

**Cilj 4**: Ker so vodilne enačbe prenosnih pojavov nelinearne, neustaljene in nehomogene, je razvoj algoritmov na podlagi BEM za simulacijo takšnih pojavov v tekočinah še vedno predmet intenzivnega raziskovanja [39], saj problem spremenljive difuzivnosti in hitrosti tekočine predstavlja izziv za uporabo BEM s osnovnimi rešitvami, ki so odvisne od teh parametrov. Predlagamo razvoj metode, ki bo omogočala hitro in učinkovito obvladovanje spremenljivih lastnosti materiala. Glavni poudarek njene uporabe bo v izračunu prenosnih pojavov v poroznih medijih, nasičenih z nanotekočino [22]. Model nanotekočine bo temeljil na dvofaznem računskem modelu, znanem tudi kot Buongiorno model [17, 18]. Model Buongiorno upošteva interakcijo med nanodelci in tekočo fazo, ki jo lahko opišemo z enim ali več mehanizmi, kot je npr. Brownova difuzija ali termična difuzija. Osnovni, enofazni matematični model bo tako razširjen z upoštevanjem toplotne difuzije nanodelcev v tekočini, kot tudi z določitvijo dodatnih parametrov modela v Brownovem gibalnem modelu.

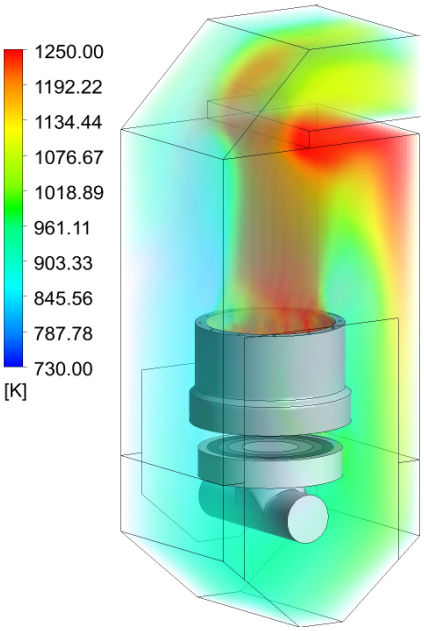



Slika 5: Shematični prikaz tokovnih razmer in usedanja delcov z visokimi in nizkimi vrednostmi Stokesovega števila na primeru geometrije usedalnika v sekundarni fazi čiščenja odpadnih vod.

Kot **cilj 5** smo si zadali raziskave na področju **prenosa delcev v okoljevarstvenem inženirstvu**. Eden od pomembnejših sistemov v okoljevarstveni tehniki je sekundarni usedalnik v čistilni napravi za odpadne vode, sl. 5. Obstaja veliko raziskovalnih člankov, ki se ukvarjajo s sledenjem Lagrangeovih delcev s pomočjo CFD analize tokovnega polja v sekundarnem usedalnem bazenu. Navadno se delci blata obravnavajo kot trde krogle z velikostno neodvisnimi lastnostmi in enostavnimi modeli upora, ki posnemajo porozno strukturo kosmičev [13, 16]. Takšni modeli vodijo v preveliko napovedovanje sekvestracije blata in zato niso priporočljivi za natančno analizo sedimentacije. Naš cilj je izpeljati model Stokesovega upora za porozne ne-sferne delce in nove modele strižnih vzgonskih sil v modelu Lagrangevega sledenja delcev v turbulentnem toku, ki ga simuliramo s CFD pristopi. Dobljene rezultate bomo primerjali z objavljenimi rezultati v znanstvenem literaturi. Z uporabo razvitih modelov bomo izvedli analizo občutljivosti obnašanja delcev pri različnih tokovnih pogojih. Nadalje bomo izvedli tudi primerjalno študijo učinkovitosti sedimentacijskih modelov na osnovi trdih krogel in poroznih ne-sfernih sedimentacijskih modelov za tipični tokovne pogoji v sedimentacijskih bazenih. Prav tako se bo preučil učinek strižnega vzgona na trajektorije delcev. Nadalje, kot praktična uporaba tokov delcev-tekočine, načrtujemo razvoj modela transporta sedimentov v rečnih ustjih in drugih vrstah toka površinskih voda. To se lahko obravnava kot poseben primer porozne snovi, kjer trdna faza ni fiksna in spreminja svoj položaj v prostoru in času ([20]). V teh primerih prihaja do izpodrivanja sedimentov, ki nastane zaradi površinske erozije površinskih tokov. To je še vedno praktičen problem v smislu hidravličnega projektiranja in modeliranja. Parametri modela gibljive porozne snovi bodo kalibrirani na primeru nekaterih vrst tokov površinskih voda z eksperimentalnimi postopki za določanje koncentracije trdnih delcev v vodnih tokovih.

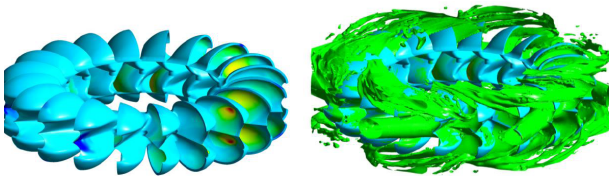
**Cilj 6**: Raziskave na področju **toplotnega inženirstva** bodo osredotočene na razvoj računalniškega modela za popolno numerično simulacijo procesa liofilizacije produktov v vialah. Model bo vključeval prenos toplote in snovi znotraj viale pri izredno nizkih sistemskih tlakih in nizkih temperaturah in tudi CFD simulacijo prenosa pare v sušilni in kondenzatorski komori pilotnega in industrijskega liofilizatorja. Raziskave bodo potekale z nenehnim močnim sodelovanjem s farmacevtskim sektorjem (LEK / Novartis). Razvili bomo tudi računalniška orodja za natančno določanje prostora za liofilizacijo. Na področju dinamične termografije se razvoj medicinskih aplikacij še ni končal, saj je še vedno veliko neznank in ovir za njegovo praktično uporabo. Zato je potrebno delati na razvoju ne samo eksperimentalne tehnike termografije, temveč tudi na numeričnem področju, s posebnim poudarkom na razvoju optimizacijskih tehnik za reševanje neposrednih in inverznih problemov, [29]. Tako se bo naše raziskovalno delo osredotočilo na razvoj numeričnih metod in novih pristopov za uporabo v dinamični termografiji s ciljem povečanja natančnosti in hitrosti numeričnih postopkov, zlasti z uporabo metode robnih elementov. Raziskovalno delo bo usmerjeno tudi v razvoj naprav, ki so potrebne za uspešno uporabo dinamične termografije. Ena od takih naprav je naprava za kontrolirano hlajenje ali ogrevanje tkiv, ki predstavlja novost, kot tudi razvoj namenske računalniške programske opreme za analizo termografskih slik. Izvirnost tega dela ne bo le zakoreninjena v razvoju nove hibridne eksperimentalno-računske metode za uporabo v medicinskih aplikacijah, ampak tudi v razvoju hitrih numeričnih tehnik, ki temeljijo na metodi robnih elementov, kjer diskretizacijo samo robu lahko uporabimo pri razvoju novih numeričnih tehnik za reševanje inverznih problemov. Enak model lahko uporabimo tudi pri razvoju nove dinamične termografske opreme s ciljem doseganja kontroliranih postopkov hlajenja in ogrevanja. Razvito eksperimentalno krmiljeno hladilno-grelno napravo bomo uporabili za validacijo razvitih računalniških orodij in za vrednotenje nekaterih pomembnih tkivnih parametrov, ki se uporabljajo v medicini. Poleg tega se bo nadaljevalo delo na modelih perfuzijskega toka in človeških faktorjev udobja ter analiziranje pojavov v rastlinjakih v smislu izboljšanja rasti rastlin.

V okviru **cilja 7** bomo raziskovali področje **dinamike toka zgorevalnih procesov**. Ukvarjali se bomo z razvojem numeričnih modelov za proučevanje procesa zgorevanja trdnih goriv v malih in industrijskih napravah, kjer je izvedeno ločevanje zraka in dobava goriva, sl. 6. Cilj raziskovalnega dela je razviti metodo, ki bo omogočila proučevanje vplivnih dejavnikov na proizvodnjo onesnaževal v sistemih zgorevanja z ločeno oskrbo zgorevalnega zraka in goriva (postavitev zraka in goriva). V ta namen bo treba nadgraditi obstoječi enodimenzionalni empirični model izgorevanja z ustreznimi podmodeli heterogenega preoblikovanja goriva v plinaste produkte in mehanizme za proizvodnjo onesnaževal. Raziskava bo zagotovila smernice za izbiro optimalnih geometrijskih in procesnih parametrov za razvoj novih sistemov. Na področju motorjev z notranjim zgorevanjem bomo še naprej raziskovali vpliv uporabe alternativnih goriv na značilnosti postopka vbrizgavanja, proces nastajanja in razpadanja pršila ter ekološke, gospodarske in izvedbene lastnosti motorja. . Hkrati bomo raziskali možnosti uporabe različnih novih aditivov za dizelska goriva in alternativna goriva, da bi izboljšali značilnosti visokotlačnih elektronsko krmiljenih sistemov za vbrizgavanje goriva v motorjih, [37, 38]. Z uporabo novih dodatkov za alternativna goriva bo v ospredju naših raziskav optimizacija konstrukcijskih in kontrolnih parametrov motorja in sistema za vbrizgavanje. Izvedeni bodo eksperimentalni in numerični preizkusi značilnosti vbrizgavanja in razvoja konvencionalnih in alternativnih curkov sintetiziranih bio-surovin ali odpadnih materialov, kjer se bo nadaljevalo tesno sodelovanje z raziskovalci z Univerze v Jaenu v Španiji. Sodobne metode matematičnega programiranja in eksperimentalne raziskave bodo uporabljene za zagotovitev doseganja vedno strožjih okoljskih standardov z novimi alternativnimi gorivi.




Slika 6: Rezultat simulacije toka tekočin v mali kurilni napravi. Prikazano je temperaturno polje.

V **cilju 8** bomo raziskovali pojav **kavitacije v hidravličnih strojih** z numeričnimi in eksperimentalnimi pristopi. Z uporabo CFD simulacij bomo nadaljevali z numerično analizo različnih kavitacijskih režimov (vrtinčna kavitacija) z obstoječimi algoritmi. Še naprej jih bomo optimizirali, da bi dosegli boljše napovedi nihanj tlaka v fazi implozije. Nato bomo rezultate prenašali v matematične modele za napovedovanje kavitacijske erozije. Hkrati bomo spremljali stanje v svetu in nadomestili algoritme z novimi, ki bodo bolj univerzalno analizirali izmenjavo spremenljivk pretoka med tekočimi in plinastimi fazami. V okviru izvedbe eksperimentov bomo uporabili sodobne tehnike vizualizacije za raziskovanje mehanizmov nastajanja površinskih poškodb na mestih, kjer je prišlo do implozije kavitacijskih struktur. Rezultati eksperimentalnega dela bodo preneseni v numerično okolje. Tako bomo lahko samostojno ovrednotili razvite algoritme ali numerične modele. V primeru razvoja Peltonovih turbin napoved kavitacije za prototip ni mogoče dobiti iz rezultatov modelskih testov. Zato je numerično napoved kavitacije na prototipu izjemno pomembna. Za napovedovanje učinkovitosti s kavitacijskim modeliranjem domena simulacije ne bo več reducirana na pet lopatic in en curek 7, ker na tak način učinkovitosti ni mogoče natančno napovedati [48]. Območje raziskave bo celotna turbina (ali polovica zaradi simetrije) in curki vseh šob. V primeru turbine z več šobami bodo simulacije še posebej zahtevne. Naslednja pomembna tema bo sprememba lopatice z namenom izboljšanja kavitacijskih lastnosti brez poslabšanja učinkovitosti turbine. Druga tema bo napoved kavitacije oblakov v vodnih turbinah in črpalkah. Prvi rezultati CFD simulacij za centrifugalno črpalko so bili že pridobljeni, vendar so bile simulacije na žalost zelo nestabilne in izjemno dolge. S takšnimi nestabilnimi in zamudnimi simulacijami ni mogoče pričakovati koristnih rezultatov v primeru razvoja novega stroja. Določiti moramo numerično postavitev, ki bo v vseh primerih služila in bo dala rezultate, ki so dovolj natančni za praktično uporabo. Zato bo študija namenjena določanju pravilne gostote računske mreže, turbulence, kavitacijskih modelov, diskretizacijskih shem in časovnega koraka za natančno napovedovanje kavitacije oblakov v razumnem času.



Slika 7: Porazdelitev tlaka na lopaticah Peltonove turbine (levo) in vodni curki prikazani kot izopovršine, kjer je delež vode 50% (desno).

### Metodologija

Predlagane raziskave bodo izvedene s kombinacijo analitičnega dela, razvoja in uporabe računalniških metod ter eksperimentalnega dela za validacijo razvitih analitičnih in numeričnih modelov. Poglobljena analiza najsodobnejših tehnik bo služila kot izhodišče za razvoj novih modelov. Izdelane bodo namenske računske metode za modeliranje ne-sfernih interakcij poroznih delcev s tekočinsko fazo, za razvoj in simulacijo vbrizgavanja goriva z uporabo sodobnih računskih paketov za simulacijo procesov v šobah. V primeru najsodobnejših kavitacijskih modelov turbinskih strojev, bodo ti eksperimentalno preučeni in konstante modelov bodo optimizirane za uporabo v industrijskih primerih. Rezultati numeričnih simulacij bodo potrjeni z rezultati laboratorijskega testiranja. Razvili bomo nove eksperimentalne proge, vključno s pregledno napravo za premazovanje z bobnom, napravo za sežiganje odpadkov majhnega obsega in novim sistemom za vbrizgavanje s sistemom common-rail z odprto krmilno elektroniko za izbiro parametrov za nadzor vbrizgavanja in ga prilagodili za eksperimentalno spremljanje in vizualizacijo postopkov vbrizgavanja.

### Časovni prikaz aktivnosti po letih

Spodnja tabela prikazuje časovni prikaz aktivnosti po letih.

| | Leto I | Leto II | Leto III | Leto IV | Leto V | Leto VI |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cilj 1 | ● | ● | ● | | | |
| Cilj 2 | | | | ● | ● | |
| Cilj 3 | | | | ● | ● | ● |
| Cilj 4 | | ● | ● | | | |
| Cilj 5 | | | | ● | ● | ● |
| Cilj 6 | ● | ● | ● | | | |
| Cilj 7 | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Cilj 8 | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

# Literatura

[1] A.-D. A. H.-D. Cheng, D. T. Cheng, 2005. Heritage and early history of the boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 29(3): 268–302.
[2] S. Rjasanow, O. Steinbach,2007. The Fast Solution of Boundary Integral Equations, Mathematical and Analytical Techniques with Applications to Engineering. *Springer US, Boston, MA*.
[3] Ravnik, J., Tibaut, J., 2019. Fast boundary-domain integral method for unsteady convection-diffusion equation with variable diffusivity using the modified Helmholtz fundamental solution. *Numerical Algorithms*, Springer US, 1-26, doi.org/10.1007/s11075-019-00664-3.
[4] R. Garg, C. Narayanan, D. Lakehal, and S. Subramaniam, 2007. Accurate numerical estimation of interphase momentum transfer in Lagrangian-Eulerian simulations of dispersed twophase flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 33(12): 1337–1364.
[5] J. Horwitz and A. Mani, 2017. Correction scheme for point-particle models applied to a nonlinear drag law in simulations of particle-fluid interaction *International Journal of Multiphase Flow*, 101: 74-84
[6] P. Gualtieri, F. Picano, G. Sardina, and C. M. Casciola, 2015. Exact regularized point particle method for multiphase flows in the two-way coupling regime. *Journal of Fluid Mechanics*, 773: 520–561.
[7] Belka, M., Lizal, F., Jedelsky, J., Elcner, J., Hopke, P. K., Jicha, M., 2018. Deposition of glass fibers in a physically realistic replica of the human respiratory tract. *J. Aerosol Sci.*, 117:149-163.
[8] Cui, Y., Sommerfeld, M., 2015. Forces on micron-sized particles randomly distributed on the surface of larger particles and possibility of detachment. *International Journal of Multiphase Flow*, 72:39-52.
[9] Cui, Y., Ravnik, J., Hriberšek, M., Steinmann, P., 2018. A novel model for the lift force acting on a prolate spheroidal particle in an arbitrary non-uniform flow. Part I. Lift force due to the streamwise flow shear. *International Journal of Multiphase Flow*, 104:103-112.
[10] Cui, Y., Ravnik, J., Verhnjak, O., Hriberšek, M., Steinmann, P., 2019. A novel model for the lift force acting on a prolate spheroidal particle in arbitrary non-uniform flow. Part II. Lift force taking into account the non-streamwise flow shear. *International Journal of Multiphase Flow*, 111:232-240.
[11] Cui, Y., Sommerfeld, M., 2019. The modelling of carrier-wall collision with drug particle detachment for dry powder inhaler applications. *Powder Technol.*, 344:741-755.
[12] Feng, Y., Kleinstreuer, C., 2013. Analysis of non-spherical particle transport in complex internal shear flows. *Phys. Fluids*, 25:091904.
[13] Gao, H., Stenstrom, M. K., 2018. Evaluation of three turbulence models in predicting the steady state hydrodynamics of a secondary sedimentation tank. *Water Research*, 143:445-456.
[14] Koullapis, P., Kassinos, S. C., Muela, J., Perez-Segarra, C., Rigola, J., Lehmkuhl, O., Cui, Y., Sommerfeld, M., Elcner, J., Jicha, M., Saveljic, I., Filipovic, N., Lizal, F., Nicolaou, L., 2018. Regional aerosol deposition in the human airways: The SimInhale benchmark case and a critical assessment of in silico methods. *Eur. J. Pharm. Sci.*, 113:77-94.
[15] Lizal, F., Elcner, J., Hopke, P. K., Jedelsky, J., Jicha, M., 2012. Development of a realistic human airway model. *Proc. Inst. Mech. Eng. H*, 226(H3):197-207.
[16] Spelman, D., Sansalone, J. J., 2017. Methods to model particulate matter clarification of unit operations subject to unsteady loadings. *Water Research*, 115:347-359.
[17] Buongiorno, J., 2016. Convective transport in nanofluids. *ASME Trans. J. Heat Transfer*, 128: 240–250.
[18] Sheremet, M.A., Pop, I., 2014. Conjugate natural convection in a square porous cavity filled by a nanofluid using Buongiorno's mathematical model. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 79: 137–145.
[19] Celli, M., 2013. Non-homogeneous model for a side heated square cavity filled with a nanofluid. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 44: 327–335.
[20] James, S. C., Jones, C., Grace, M. D., Roberts, J. 2010. Recent Advances in Sediment Transport Modeling. *Journal of Hydraulic Research*, 48(6): 754-763.

[21] James, S. C., Jones, C., Grace, M. D., Roberts, J. 2010. A numerical study of nanofluid natural convection in a cubic enclosure with a circular and an ellipsoidal cylinder. *International journal of heat and mass transfer*, 89: 596-605.
[22] Kramer Stajnko, J., Ravnik, J., Jecl, R., 2017. Natural convection in a square cavity filled with a non-darcy porous medium saturated with nanofluid by the boundary element method. *Journal of porous media*, 20(10): 921-939.
[23] B. Lahiri, S. Bagavathiappan, T. Jayakumar, J. Philip, 2012. Medical applications of infrared thermography: A review. *Infrared Physics & Technology*, 55(4):221-235.
[24] C. Magalhaes, R. Vardasca, J. Mendes, 2018. Recent use of medical infrared thermography in skin neoplasms, *Skin Research and Technology*, (1-3): 1–5.
[25] M. Cetingul, C. Herman, 2010. A heat transfer model of skin tissue for detection of lesions: Sensitivity analysis. *Phys. Med. Biol.* 55: 5933–5951.
[26] T.-Y. Cheng, C. Herman, 2014. Analysis of skin cooling for quantitative dynamic infrared imaging of near-surface lesions. *International Journal of Thermal Sciences*, 86: 175–188.
[27] M. Strakowska, R. Strakowski, M. Strzelecki, G. De Mey, B. Wiecek, 2016. Evaluation of perfusion and thermal parameters of skin tissue using cold provocation and thermographic measurements. *Metrology and Measurement Systems*, 23(3): 373–381.
[28] M. P. Cetingul, C. Herman, 2011. Quantification of the thermal signature of a melanoma lesion. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(4): 421–431.
[29] Iljaž, J., Wrobel, L.C., Hriberšek, M., Marn, J., 2019. The use of Design of Experiments for steady-state and transient inverse melanoma detection problems. *International Journal of Thermal Sciences*, 135: 256-275.
[30] Marn, J., Chung, M., Iljaž, J, 2019. Relationship between metabolic rate and blood perfusion under Fanger thermal comfort conditions. *Journal of Thermal Biology*, 80: 94-105.
[31] Rajh, B., Yin, C., Samec, N., Hriberšek, M., Kokalj, F., Zadravec, M., 2019. Advanced CFD modelling of air and recycled flue gas staging in a waste wood-fired grate boiler for higher combustion efficiency and greater environmental benefits. *Journal of environmental management*, 218: 200-208.
[32] Kalghtagi, G., 2018. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Applied Energy*, 225: 965-974.
[33] Srinivasacharya, A. A., Gottekere, N. K. 2018. An overview of after-treatment systems for diesel engines *Environmental Science and Pollution Research* , 1-4.
[34] Huang Y., Suarawski N.C., Organ B., Zhou J.L., Tang O.H.H., Chan E.F.C., 2019. Fuel consumption and emissions performance under real driving: Comparison between hybrid and conventional vehicles. *Science of the Total Environmental* , 275-282.
[35] Garcia, J. Monsalve-Serrano, R. Sari, N. Dimitrakopoulos, M. Tuner, P. Tunestal, 2019. Performance and emissions of a series hybrid vehicle powered by a gasoline partially premixed combustion engine. *Applied Thermal Engineering* , 564-575.
[36] Van De Beld B., Holle E., Florijn J., 2013. The use of pyrolysis oil and pyrolysis oil derived fuels in diesel engines for CHP applications. *Applied Energy* , 102: 190-197.
[37] Khalife E, Tabatabaei M, Demirbas A, Aghbashlo M., 2017. Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady state operation. *Progress in Energy and Combustion Science* , 59: 32-78.
[38] Najafi B, Akbarian E, Lashkarpour SM, Aghbasho M, Ghaziaskar HS, Tabatabaei M. , 2019. Modeling of a dual fueled diesel engine operated by a novel fuel containing glycerol triacetate additive and biodiesel using artificial neural network tuned by genetic algorithm to reduce engine emissions. *Energy*, 168: 1128-1137.
[39] M. AL-Jawary, L. C. Wrobel, 2012. Radial integration boundary integral and integro-differential equation methods for two-dimensional heat conduction problems with variable coefficients. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 36(5): 685–695.
[40] F. Mashali, E. M. Languri, J. Davidson, D. Kerns, W. Johnson, K. Nawaz, G. Cunningham, 2019. Thermo-physical properties of diamond nanofluids: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129: 1123–1135.
[41] Bohling, P., Khinast, J.G., Jajcevic, D., Davies, C., Carmody, A., Doshi, P., Am Ende, M. T., Sarkar, A., 2019. Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method Modeling of an Industrial-Scale Wurster Coater. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 108: 538-550.
[42] Peters, B., Baniasadi, Ma., Baniasadi, Me., Besseron, X., Donoso, A.E., Mohseni, M., Pozzetti, G., 2018. XDEM multi-physics and multi-scale simulation technology: Review of DEM–CFD coupling, methodology and engineering applications. *Particuology*, In Press, https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.04.005 .
[43] M. Dular, M. Petkovšek, 2015. New insights into the mechanisms of cavitation erosion. *Journal of physics, Conference series*, 656: 1-4.
[44] A. Peters, U. Lantermann, O. el Moctar, 2018. Numerical prediction of cavitation erosion on a ship propeller in model- and full-scale. *Wear*, 408-409: 1-12.
[45] S. Mottyll, R. Skoda, 2016. Numerical 3D flow simulation of ultrasonic horns with attached cavitation structures and assessment of flow aggressiveness and cavitation erosion sensitive wall zones. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31: 570-589.
[46] Rosetti A, Pavesi G, Ardizzon, G., Santolin, A, 2014. Numerical analysis of cavitating flow in a Pelton turbine. *J. Fluids Eng.*, 136: 081304-1
[47] Jošt, D., Škerlavaj, A., Morgut, M., Nobile, E. 2017. Numerical Prediction of Cavitating Vortex Rope in a Draft Tube of a Francis Turbine with Standard and Calibrated Cavitation Model. *Journal of Physics: Conference Series*, 813(1): 012045.
[48] Jošt, D., Škerlavaj, A., Morgut, M., Pirnat, V., Nobile, E. 2018. Numerical Prediction of Efficiency and cavitation for a Pelton Turbine. *29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Kyoto, Japan.
[49] Barroso, G., Roth, S., Nussbaumer, T., 2019. Investigation of biomass conversion on a moving grate by pyrolysis gas analysis and fuel bed modelling. *Energy*, 174: 897–910.
[50] Gomez, M. A., Martin, R., Chapela, S., Porteiro, J., 2019. Steady CFD combustion modeling for biomass boilers: An application to the study of the exhaust gas recirculation performance. *Energy Conversion and Management*, 179: 91–103.
[51] Bugge, M., Skreiberg, O., Haugen, N. E. L., Carlsson, P., Houshfar, E., Lovas, T., 2015. Numerical Simulations of Staged Biomass Grate Fired Combustion with an Emphasis on NOx Emissions. *Energy Procedia*, 75: 156-161.
[52] Suzzi, D., Toschkoff, G., Radl, S., Machold, D. Fraser, S., Glasser, B., Khinast, J. 2012. DEM simulation of continuous tablet coating: Effects of tablet shape and fill level on inter-tablet coating variability. *Chemical Engineering Science*, 69: 107-121.

# F. POTENCIALNI VPLIV ZARADI RAZVOJA, RAZŠIRJANJA IN UPORABE PRIČAKOVANIH REZULTATOV RAZISKAV

## 34. Predstavitev raziskovalnega programa za ocenjevanje prijave po kriteriju Potencialni vpliv zaradi razvoja, razširjanja in uporabe pričakovanih rezultatov raziskav

### Pomen za razvoj znanosti oziroma stroke

Razumevanje in sposobnost napovedovanja obnašanja tehniških sistemov, v katerih prevladujejo turbulentni in večfazni tokovi, temelji na poglobljenem znanju o dogajanju (prenosnih pojavih) v takšnih tokovih. Razvoj novih, natančnih metod računalniške simulacije prenosnih pojavov, ki v kvaliteti rezultatov močno presegajo klasične, na empiričnih spoznanjih utemeljene inženirske metode preračunov, je tako izjemnega pomena za razvoj inženirskih znanosti na področju energetskega, procesnega in okoljskega inženirstva. Pri tem si bomo prizadevali razviti ciljno uporabne napredne računske metode za reševanje nekaterih kompleksnih transportnih pojavov, za katere obstajajo le delne računske rešitve, in za validaciji teh metod, ki bodo znanstvenikom in strokovnjakom omogočile izvajanje parametričnih analiz in optimizacijo ciljnih procesov, naprav in strojev.

Na področju razvoja novih numeričnih metod bo pri metodi robnih elementov razvoj ciljno usmerjen v izboljšanje učinkovitosti in natančnosti modelov procesov, značilnih za naprave v procesni in okoljski tehniki, ob tem pa bo izboljšana tudi računska in spominska zahtevnost metode. Razvoj naprednih modelov prenosa toplote in snovi v razpršenih tokovih bo omogočil podrobnejši vpogled v kompleksno tokovno, toplotno in snovno dogajanje v toplotno snovnih (sušilniki, adsorberji) in mehanskih (usedalni bazeni) ločevalnih napravah, hidravličnih strojih, napravah za pretvorbo odpadnih snovi v energijo kot tudi motorjih z notranjim zgorevanjem. Poseben poudarek bo namenjen razvoju novih računalniških modelov za virtualno načrtovanje in optimizacijo vakuumskih sublimacijskih sušilnikov ter razpršilnih in fluidizirajočih sušilnikov.

Uporaba numeričnih metod za izračun toka v turbinskih strojih je z znanstvenega vidika pomembna, ker omogoča vpogled v nestacionarne in kavitirajoče tokovne razmere v turbinskih strojih. S tem povečujemo znanje o dogajanju v različnih stabilnih (delni pretoki, optimalna točka obratovanja, polna moč) in prehodnih režimih obratovanja (zagon, pobeg) različnih vrst turbin, vključujoč Pelton turbino. Glede na vedno strožje ekološke predpise in problematiko uporabe fosilnih goriv je nujno iskanje možnosti za uporabo alternativnih goriv v motorjih z notranjim zgorevanjem. Novo razviti matematični modeli za numerično simulacijo procesov vbrizgavanja in zgorevanja bodo zmanjšali drago eksperimentalno delo in omogočili hitrejši razvoj učinkovitejših in okoljsko sprejemljivejših motorjev. Razvoj novih modelov ravnotežnega večstopenjskega uplinjanja trdnih odpadkov na rešetki bo omogočil podrobnejšo analizo procesa zgorevanja v primarni in sekundarni komori značilne naprave za termično izrabo odpadkov. Metode termografije bomo z znanstvenimi pristopi za izračun inverznega problema prenosa toplote v bioloških tkivih nadgradili za uporabo v medicinski tehniki.

### Potencialni vpliv na razvoj na področju gospodarstva

Na področju procesne tehnike in v farmacevtski industriji se v Sloveniji kot tudi širše pojavljajo velike potrebe po numeričnem modeliranju prenosnih pojavov v razpršeni fazi trdnih delcev, predvsem v obliki ustvarjanja obloge delcev in sušenja delcev, sušenja v pogojih sublimacije oz. procesa liofilizacije, ter procesa filtracije. Razvili bomo virtualni model industrijskega liofilizatorja za sušenje snovi v več tisoč vijalah. Kot aplikacija bo uporabljen tudi primer razpršilnega sušenja in sušenja v lebdečem sloju trdnih delcev v toku zvezne tekočine (sušilni zrak), kjer bo uporabljen tristopenjski model sušenja, ki omogoča realnejšo napoved porabe energije tega izjemno energijsko potratnega procesa. Nadaljevali bomo z uporabo raziskav na numeričnem področju

pri razvoju modelov za opis toplotnih razmer in gibanja vlage v avtomobilskih svetilih, kjer ima Slovenija že dva velika proizvajalca, od katerih s Hella Saturnus sodelujejo tudi člani naše raziskovalne skupine. Vodna energija je najpomembnejša med obnovljivimi viri energije brez izpustov CO2. Slovenija ima dolgoletno tradicijo in veliko znanja in izkušenj pri razvoju in izdelovanju vodnih turbin, kjer izstopa Kolektor Turboinštitut, partner v raziskovalnem programu. Za obstoj na trgu so bistvene odlične karakteristike strojev in zmanjšanje stroškov. Oboje lahko dosežemo z razvojem novih numeričnih modelov, ki natančneje opišejo delovanje turbine. Pri manjših projektih, kjer je izdelava modela predraga, le z numeričnim izračunom lahko preverimo, če so garantirane karakteristike dosežene. Vsakoletni obiski študentov strojništva iz Maribora popularizirajo porabo numeričnih metod v industriji, podjetje Kolektor Turboinštitut pa omogoča tudi izdelavo diplome, magisterije in doktorate iz področja numerične analize toka v hidravličnih strojih. Na področju okoljskega inženirstva bo poudarek na razvoju postopkov toplotnega izkoriščanja trdnih odpadkov in analizi primernosti goriv, pridobljenih iz komunalnih odpadkov, za uporabo v takšnih napravah. Ker je problematika komunalnih odpadkov v Sloveniji pereč problem, bomo s tem prispevali k pospešitvi reševanja tega problema. Razvite metode numeričnega modeliranja večfaznega toka bodo uporabne tudi za študij bioloških sistemov (bazen čistilne naprave), saj se mikroorganizmi v tokovih velikokrat so oz. se obnašajo kot delci.

**Potencialni vpliv na razvoj družbenih in kulturnih dejavnosti**

Na področju učinkovite rabe energije bomo na podpodročju ogrevanja, ohlajevanja in klimatizacije (HVAC) uporabili izsledke iz analize učinkovitosti različnih vrst ogrevanja ter rezultate značilnih obremenitvenih profilov značilnih skupin porabnikov zemeljskega plina za optimizacijo uporabe energije v stanovanjskih in poslovnih objektih ob upoštevanju nadzora zunanje in notranje temperature za vsako ogrevalno enoto. Z obravnavo vprašanja termične pretvorbe odpadkov bomo prispevali k razumevanju, nadzoru in izboljšanju ravnanja z odpadki v Sloveniji, kar je trenutno v kritični fazi razvoja.

Razvoj novih metod in pristopov na področju dinamične termografije ima lahko pomemben vpliv na področju razvoja novih diagnostičnih metod in inštrumentov za določitev lastnosti heterogenih bioloških tkiv, kjer izstopa potencial uporabe v medicini pri zgodnjem odkrivanju podkožnih melanomov. Zaradi razvoja novega pristopa ima omenjena raziskava direkten vpliv na področje medicine in v gospodarstvu na področju termografskih kamer ter potrebne programske opreme.

Na področju visokošolskega izobraževanja je večina članov raziskovalne skupine aktivno vključena v proces predavanja na dodiplomskem in podiplomskem študiju, kar omogoča hiter prenos najsodobnejših znanj s področja energetike, procesne in okoljske tehnike v študij strojništva in tehničnega varstva okolja. Strokovna praksa študentov v raziskovalni skupini Kolektor-Turboinštituta predstavlja temelj za hitrejše uvajanje računalniških metod v industrijska okolja, hkrati pa vodijo do diplomskih, magistrskih in doktorskih disertacij s področja numerične analize tokov v hidravličnih strojih.