

FIZIKALNO OZADJE PRETAKANJA HIDRAVLICNE TEKOČINE SKOZI FILTER

Darko Lovrec

Izvleček:

Filtriranje oziroma izločanje neželenih trdnih delcev iz medija, ki ga želimo očistiti, pa naj gre za različne pline ali tekočine, je zelo kompleksen proces. To se kaže že pri osnovnih pojmi, vezanih na vrsto, material in obliko filtra ter proces filtriranja. Še posebej je to vidno pri poglobljenem poznavanju fizikalnega ozadja prehajanja tekočine skozi filter, mehanizmov izločanja neželenih delcev ter pri modeliranju in simulaciji tega procesa. Kljub kompleksnosti je poznavanje fizikalnega ozadja nujno pri snovanju ustreznih filtrirnih materialov in celotnega filtra. Slednje je običajno v domeni proizvajalcev filtrirnih materialov in filtrov ter tistih, ki se ukvarjajo z raziskavami, vezanimi na področje filtriranja.

Prispevek podrobneje podaja ozadje procesa prehajanja hidravlične tekočine skozi filter. V uvodu so podane splošne informacije, vezane na načine filtriranja in vrsto filtrov, predvsem tistih, ki so primerni za filtriranje hidravličnih tekočin in jih pozna vsak skrbnik hidravličnih ali mazalnih sistemov. V nadaljevanju so podrobneje predstavljeni fizikalno ozadje prehajanja tekočine skozi filter, različni mehanizmi izločanja neželenih delcev ter pristop k matematičnemu modeliranju in numerični simulaciji kot učinkovitemu orodju za študije, vezane na problematiko filtriranja. Navedeni viri raziskav in študij ter spoznanja omogočajo uporabnikom boljše razumevanje teh procesov, razvijalcem filtrov pa podajajo osnovo za snovanje učinkovitega filtra.

Ključne besede:

hidravlični filtri, prehajanje tekočine, načini izločanja delcev, fizikalne enačbe, numerična simulacija

1 Uvod

Proces filtriranja z načini izločanja neželenih kontaminantov iz tekočine, vplivnimi faktorji ter vrstami filtrov je v strokovni literaturi podan na dva načina. V bolj ali manj poljudni obliki proces filtriranja pojasnjujejo proizvajalci filtrirnih materialov in je bolj namenjena informiranju uporabnikov filtrov (npr. [1] do [5]). Z bolj znanstvenega in fizikalnega vidika pa so mehanizmi izločanja kontaminantov podani v ozkostrokovni literaturi, kjer je problematika filtriranja obravnavana poglobljeno (npr. [6] do [10]). Pri slednji opis procesa filtriranja že temelji na poglobljenem znanju s področja mehanike tekočin.

Skladno s splošno terminologijo je filtriranje postopek izločanja trdnih delcev, mikroorganizmov ali kapljic, posplošeno imenovanih kontaminanti, iz medija, ki ga filtriramo. Pri tem gre lahko za tekočine ali pline, iz katerih izločamo kontaminante pri prehodu skozi ustrezen filtrirni material. Ta je praviloma prepusten samo za določeno fazo medija, pri čemer se kontaminanti ujamejo na zunanji površini filtrirnega materiala ali/in v njegovi notranjosti. Slednje je odvisno tudi od vrste ter od snovnih in

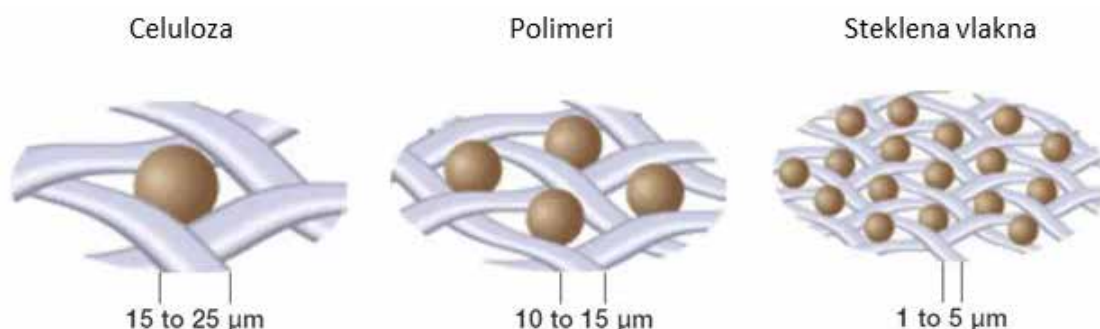
geometrijskih značilnosti filtrirnega materiala, kar načeloma prikazuje *slika 1*.

Steklena vlakna, polimeri in celuloza so najpogostejše uporabljane vrste filtrirnih materialov. Velikost in gostota vlaken določata velikost por in poroznost filtrirnega materiala. Razen tega ima vsaka vrsta materiala še svoje specifičnosti, prednosti in slabosti. Tako je npr. prednost vlaken manjšega premera v večji sposobnosti kopičenja ujetih delcev, v manjšem padcu tlaka preko filtra in v daljši uporabi dobi filtrskega vložka. Pri tem imajo vlakna neorganskega izvora pred vlakni organskega izvora prednost v kemični združljivosti s širšim naborom tekočin, ni pojava nabrekanja vlaken in nimajo omejitve roka uporabnosti.

Pomembni sta tudi oblika in razporejenost vlaken. Vlakna filtrirnega materiala z enako velikimi porami so med seboj povezana z vezivom, ki preprečuje deformacije zaradi sprememb tlaka, pretoka, temperature ali staranja materiala. Pri filtrirnih materialih z različno velikimi porami pa se lahko vlakna ob spremembah tlaka ali pretoka premikajo, kar lahko pripelje do prehodnih poti z manjšim uporom, izločanja že ujetih delcev in tudi do nastanka dodatnih delcev zaradi razpada vlaken.

Pri filtrirnem materialu z enotno velikostjo in obliko por se delci običajno ujamejo na zunanjem delu

Prof. dr. Darko Lovrec, univ. dipl. inž., Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

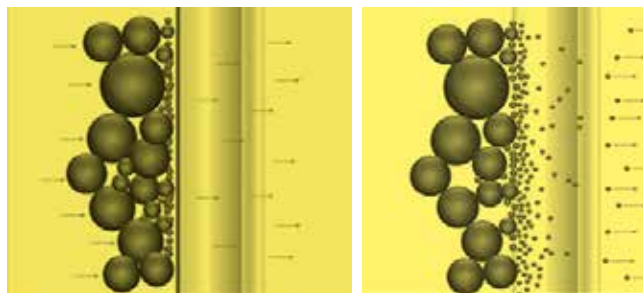


Slika 1 : Ujetje delca med vlakni različnega filtrirnega materiala [1]

filtrirnega materiala. To na nek način omejuje učinkovito uporabo celotne prostornine filtra in povečuje obratovalne stroške, saj je količina ujetih delcev manjša, kot bi lahko bila. S tem se poveča lokalna nepropustnost filtrirnega materiala, posledično pa skrajša uporabna doba filtra. Pore stožčaste ali spremenljive oblike so po izkušnjah proizvajalcev filtrov primernejše za uporabo pri mazalnih in hidravličnih sistemih. Filtrirni material z vedno ožjimi porami zajame večje delce v bolj grobem zunanem (vstopnem) delu, s čimer je omogočeno, da manjše pore v notranjem delu (izstopnem delu v smeri toka tekočine) zajamejo delce kritične velikosti, tiste, ki so velikosti tolerance rež v hidravličnih komponentah.

Prav tako se neželeni delci v filtrirnem materialu ujamejo na različne načine. Na področju hidravlične pogonske tehnike glede na zgradbo in obliko filtrirnega materiala običajno razlikujemo med dvema osnovnima vrstama filtrov: med površinskimi in globinskimi filtri. Razlike v načinu izločanja delcev omenjenih načinov načelno prikazuje *slika 2*.

S poznavanjem osnovnih načinov delovanja filtrov in materialov ter izvedb filtra je razumevanje procesa filtracije dokaj enostavno. S fizikalnega stališča pa je opis filtriranja veliko bolj kompleksen, saj ga moramo za namene razvoja filtrov opisati z ustreznimi enačbami, ki bolj ali manj podrobno podajajo dogajanje. Pri takšnem opisu je možno upoštevati tudi snovne lastnosti in vrsto medija, ki ga filtriramo, vrsto filtrirnega materiala, vpliv obratovalnih razmer, npr. temperaturo medija ali tlak in tudi časovno spreminjanje razmer.



Slika 2 : Učinek filtriranja s površinskim (levo) in z globinskim filtrom [5]

2 Prehajanje tekočine skozi filter in izločanje delcev

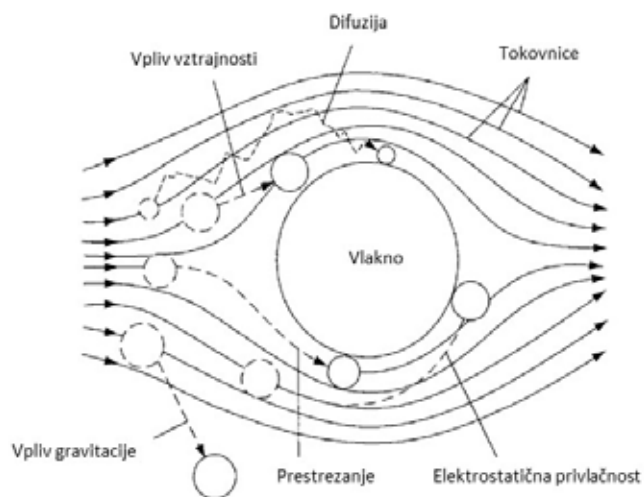
Splošno področje filtriranja je izredno široko in zelo raznovrstno, saj gre za čiščenje različnih tekočin ali pa plinov. Že samo področje filtriranja tekočin je zelo široko, saj zajema tako čiščenje meteoritnih in odpadnih voda ter vseh vrst tekočin, ki jih uporabljamo na področju industrije v raznovrstnih tehnoloških procesih. Vsak način filtriranja ima svoje specifičnosti tako glede medija, ki ga filtriramo, uporabljenega filtrirnega materiala, oblike filtra kot celote ter tudi zahtev, ki jih želimo doseči s filtriranjem. V nadaljevanju bo v ospredju problematika filtriranja tekočin maziv, kamor spadajo tudi hidravlične tekočine.

S fizikalnega gledišča je proces filtriranja dokaj zapleten proces, ki ga je možno teoretično zelo podrobno opisati le z ustreznimi enačbami. V osnovi gre za opis prehajanja tekočine skozi material, ki to prehajanje ovira. Matematični opis prehajanja tekočine skozi filter temelji na zakonih in enačbah s področja mehanike tekočin, npr. Navier-Stokesove enačbe, Darcyjevega zakona in drugih. [6] do [10]

2.1 Načini izločanja delcev

Raziskovalci, ki se ukvarjajo s problematiko filtriranja in poznavanjem mehanizma izločanja oz. zadrževanja drobnih delcev v filtrirnem materialu, so v zadnjem obdobju ponovno intenzivirali raziskave. Tako je učinkovito filtriranje postalo še bolj aktualno glede filtriranja škodljivih industrijskih izpustov v okolje in pa v obdobju pandemije, kjer je bilo v ospredju preprečevanje širjenja kapljic in virusov z zaščitnimi maskami. Spoznanja so bila prenesena tudi na področje filtriranja funkcionalnih tekočin in so tako še dopolnila že znana spoznanja. [11] do [15]

Za filtriranje tekočin in tekočin maziv običajno uporabljamo netkane, porozne filtrirne materiale, kar je potrebno upoštevati pri teoretičnem opisu prehajanja tekočine skozi filtrirni material. Večina teorij, ki se ukvarja z opisom mehanizma ujetja neželenih delcev pri prehajanju tekočine skozi filtrirni material,



Slika 3 : Načini izločanja delcev v filtrirnem materialu [8]

velja praviloma za netkane filtrirne materiale in globinsko filtriranje. Delci se lahko ujamejo na filtrirnem materialu ali v njem zaradi različnih vzrokov oz. mehanizmov: zaradi vpliva gravitacije, vpliva vztrajnosti, prestrežanja delca, vpliva difuzije ali elektrostatične privlačnosti. Podrobnosti opisa posameznih mehanizmov izločanja delcev pri prehajanju skozi filtrirni material je moč najti v literaturi, ki se poglobljeno ukvarja s to problematiko (npr. [8]). Omenjene mehanizme izločanja delcev prikazuje *slika 3*.

Način oziroma mehanizem izločanja delcev je povezan z velikostjo delcev. Elektrostatična privlačnost temelji na električnem ali elektrostatičnem naboju na delcu in/ali vlaknu, ki prisili delec, da se izloči iz toka tekočine in ga pritegne k vlaknu. Difuzija temelji na Brownovem (cik-cak) gibanju zelo majhnih delcev ($< 0,04 \mu\text{m}$). To naključno in verjetnostno gibanje bo povzročilo, da se delec izloči iz toka tekočine in se morda zatakne ob vlakno. Majhni delci (velikosti med $0,04 \mu\text{m}$ in $0,4 \mu\text{m}$) so lahko že preveliki za difuzijsko izločanje in so še premajhni, da bi imeli zadostno energijo gibanja in vztrajnostni učinek. Delce te velikosti filtrirni material najtežje ujame. Vpliv izločanja zaradi vztrajnosti se pojavi, ko je vztrajnost delcev tako visoka, da ima dovolj energije, da se izloči iz toka tekočine in udari v vlakno. Do prestrežanja pride, ko delec nima dovolj vztrajnosti, da bi se izločil iz toka tekočine, vendar se dovolj približa vlaknu filtrirnega materiala, da lahko naravne sile delec pritegnejo na vlakno. Za matematično obravnavo Lastow in Podgorski [16] definirata mehanizem prestrežanja na ta način: »En delec prestreže drugi delec takrat, ko je razdalja od središča mase delca do površine vlakna enaka ali manjša od polmera delca.« Omenjeni osnovni mehanizmi izločanja delcev se nanašajo na izločanje delcev iz zraka, ki ga filtriramo, ali pa tudi iz tekočine.

Na področju hidravličnih tekočin so značilne velikosti delcev relativno velike. Delci so večji od $4 \mu\text{m}$

in imajo posledično tudi večjo gibalno količino ter vztrajnost pri gibanju. Zato se bodo verjetno ločili od tokovnic in se ujeli v skladu z vztrajnostnim mehanizmom ali s prestrežanjem v filtrirnem materialu.

2.2 Pristop k matematičnemu opisu načina izločanja delcev

Filtriranje je splošno definirano kot proces odstranitve določenih delcev iz premikajoče se tekočine z ujetjem delcev v večplastno strukturo filtrirnega materiala. Filtri, ki jih najpogosteje uporabljamo na področju hidravlične pogonske tehnike (npr. kot povratni filter, obtočni filter ...), so običajno sestavljeni iz več plasti filtrirnega in podpornega materiala. Skladno s strokovnim izrazoslovjem s področja filtriranja gre za netkani filtrirni material. Pri tem gre za preproste oblike z naključno strukturo vlaken, običajno v obliki plasti, ki jih uporabljamo za ločevanje ene ali več faz iz gibajoče se tekočine, ki prehaja skozi filtrirni material. Sem spada večina filtrov. Pojem netkani filtrirni material predstavlja izhodišče za vso nadaljnjo teoretično obravnavo procesa izločanja delcev iz tekočine, ki jo filtriramo.

Obstajata dve glavni smeri teorije o netkanih filtrirnih medijih: t. i. teorija kanalov in teorija celičnega modela. Različica teorije celičnega modela je teorija upornostnega modela. Prvotna teorija je temeljila na filtraciji skozi nevlaknaste materiale, kot je npr. pesek. Pogosto uporabljen model kapilarne cevi predpostavlja, da je medij snop valjastih cevok, ki potekajo od ene površine medija do druge, ki niso nujno pravokotne na površino. Teorijo kanalov je mogoče uporabiti za netkane filtrirne materiale, ki se uporabljajo pri filtraciji tekočin, zlasti če je material kompaktne strukture visoke gostote.

Veliko teorij celičnih modelov in upornostnega modela je bilo razvitih za vlaknaste medije za zračne filtre. Modeli temeljijo na premikanju delca mimo posameznega vlakna in kombinacije vlaken, ki sestavljajo filtrirni material. Pri netkanih filtrirnih materialih so vlakna predpostavljena kot valji. Teorija celičnega modela predpostavlja niz krožnih valjev, pri čemer je vsak valj v celici tekočine, obdani z valjastimi ovoji. Vsak valj s svojo tekočino in ovojem je obravnavan kot celica. Teorija upornostnega modela analizira upor na vsaki ovojnici.

Teorija celičnega modela je primernejša za opis filtracije tekočin. Wakeman in Tarleton [17] razpravljata o delu celičnega modela Happela [18] ter Happela in Brennerja [19] v zvezi s filtracijo tekočine, kjer je medij sklop krogel. Njihov model temelji na predpostavki niza krožnih valjev, pri čemer je vsak valj v celici tekočine, obdani pa so z valjastimi ovoji. Vsak valj s svojo tekočino in ovojem se obravnava kot celica. Teorija upornostnega modela, različica teorije celičnega modela, analizira upor na vsaki ovojnici.

Na področju mehanike tekočin (in s tem na področju hidravlike) imamo tri osnovne zakone, s katerimi lahko podrobno opišemo delovanje realnega hidravličnega sistema. V zapisih teh zakonov se pojavlja gostota kot snovna lastnost hidravlične tekočine. Gre za zakon o ohranitvi mase, zakon o ohranitvi energije in zakon o ohranitvi gibalne količine. Pri obravnavi procesa filtriranja sta v ospredju zakon o ohranitvi mase in zakon o ohranitvi gibalne količine (npr. [20], [21]).

Zakon o ohranitvi mase se nanaša na opazovani prostor oz. kontrolni volumen, za katerega pravi, da bo neto masni tok skozi opazovani volumen enak masi, shranjeni ali odstranjeni iz tega volumna. V pogojih stacionarnega toka to pomeni, da mora biti masa, ki zapuša kontrolni volumen, enaka masi, ki vstopa v ta volumen. Določanje hitrosti toka za določen masni tok in območje pretoka temelji na enačbi kontinuitete, ki izhaja iz tega zakona.

Newtonovi zakoni o gibanju (oz. zakon o ohranitvi gibalne količine) so osnovni za vsako analizo sil, ki se pojavljajo ob različnih pogojih gibanja teles (kontinuum), torej tudi pri toku tekočine. Rezultirajoča sila se izračuna na podlagi pogoja, da je velikost sile enaka velikosti spremembe impulza.

Izhodiščna obravnava zakonov v mehaniki tekočin temelji na Lagrangeevem in Eulerjevem pristopu k obravnavi analize tokovnega polja. Lagrangeev pristop temelji na zamisli sistema masnih delcev, Eulerjev na teoriji polja (npr. [20], [22], [23]).

V literaturi je moč srečati različne pristope k obravnavi posameznega zakona. V primeru potrebe po podrobnejših raziskavah s področja mehanike tekočin je vsekakor potrebno poznati vsa izhodišča, predpostavke, omejitve ..., iz katerih izhaja zapisana oblika zakona ali enačbe. V primerih, ko je bolj v ospredju stroka oz. aplikativna uporabnost določene enačbe, so določeni koraki in s tem izhodišča izpuščeni, izhodišče obravnave pa je že bolj ali manj končna oblika zapisa zakona ali enačbe.

Obravnavo omenjenih zakonov bi npr. lahko pričeli s splošnim zapisom posplošenega mirujočega kontrolnega volumna, veljavnega za masni sistem [20], [21]. Na področju hidravlike skoraj vedno opazujemo dogajanje v mirujočih volumnih, npr. v hidravlični cevi, v komorah hidravličnih komponent, npr. ventilov, črpalk, hidravličnih motorjev, valjev ... in tudi filtrov.

$$\left(\frac{DF}{Dt}\right)_{V_m} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_k} f \rho dV + \int_{A_k} f \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

Enačba (1) predstavlja Reynoldsov prenosni teorem posplošenega mirujočega kontrolnega volumna nekega masnega sistema V_m ; časovni prirastek veličine F v masnem sistemu je enak časovnemu prirastku

veličine F v kontrolnem volumnu V_k in rezultirajočemu pretoku veličine F preko kontrolne površine A_k . Ker je kontrolni volumen v našem primeru konstanten, lahko enačbo (1) zapišemo še drugače [21]:

$$\left(\frac{DF}{Dt}\right)_{V_m} = \int_{V_k} \frac{\partial(f \rho)}{\partial t} dV + \int_{A_k} f \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

V enačbah (1) in (2) predstavlja člen $(DF/Dt)_{V_m}$ snovski odvod časovne spremembe veličine F masnega sistema, ki daje Lagrangeev značaj tega člena. Pri tem F oz. natančneje zapisano $F(\vec{r}, t)$ predstavlja poljubno ekstenzivno veličino, npr. maso, energijo, gibalno količino itn. S spremenljivko f , za katero velja $f(\vec{r}, t) dF/dm$, pa je označena pripadajoča intenzivna veličina v kontrolnem volumnu V_k v danem trenutku t . Veličina $\vec{r}$ splošno predstavlja položaj v prostoru. Podrobnejša obravnava je na voljo v literaturi [20].

Za obravnavo dogajanja pri filtriranju sta izhodiščni enačbi enačba gibanja in kontinuitete. Kot rečeno, je pristopov na podlagi izhodiščnih enačb več, starejšega in novejšega datuma, in so prilagojene ter dopolnjene s posebnostmi obravnavanega problema. V nadaljevanju bo obravnava temeljila na poenostavljeni in skrajšani razlagi avtorja Birda. [24]

Kontinuitetna enačba je poenostavljeno masna bilanca tekočine, ki teče skozi opazovani prostor. Podaja, da je stopnja »nakopičenja« mase v tem elementu enaka razliki med maso na vstopu in maso na izstopu. V vektorski obliki jo lahko to zapišemo kot:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \mathbf{v}) \quad (3)$$

V enačbi (3) predstavlja ρ gostoto, t časovno spremenljivko, $\mathbf{v}$ vektor hitrosti, $\nabla \cdot \rho \mathbf{v}$ je vektorski operator, ki označuje divergenco masnega toka $\rho \mathbf{v}$.

Ob predpostavki, da je tekočina nestisljiva, se enačba (3) poenostavi v gibalno enačbo (4):

$$(\nabla \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad (4)$$

Podobno kot kontinuitetna enačba podaja gibalna enačba ravnovesno stanje okoli opazovane prostornine tekočine. Enačba navaja, da je velikost spremembe gibalne količine enaka velikosti gibalne količine na vstopu v opazovani sistem, zmanjšana za delež na izstopu, ob upoštevanju vseh drugih sil, ki delujejo na sistem. Vektorsko obliko enačbe podaja enačba (5):

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] + \rho \mathbf{g} \quad (5)$$

V primeru upoštevanja konstantne viskoznosti in gostote ρ enačba (5) preide v obliko znane Navier-Stokesove enačbe (6):

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - [\mu \nabla^2 \cdot \mathbf{v}] + \rho \mathbf{g} \quad (6)$$

Za primer $[\nabla \cdot \tau] = 0$ lahko enačbo (6) poenostavimo na obliko znane Eulerjeve enačbe:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \rho g \quad (7)$$

Pri podrobnejšem opisu prehajanja tekočine in delčkov skozi porozni filtrirni material je razen teh osnovnih enačb potrebno upoštevati še poroznostne lastnosti filtrirnega materiala. Te so zajete v t. i. konstanti permeabilnosti, ki je eden od parametrov Darcyjevega zakona. Darcyjev zakon predstavlja osnovno enačbo za opis prehajanja tekočine skozi porozni filtrirni material. Razen lastnosti poroznega materiala je potrebno upoštevati še hitrost prehajanja tekočine in s tem povezano vrsto toka skozi filtrirni material. Slednje podaja znano Reynoldsovo število. Pri netkanih filtrirnih materialih ima struktura materiala zelo majhne pore, zato ni nevarnosti pojava turbulentnega toka in s tem povezanih visokih vrednosti Reynoldsovega števila. Tako je skozi filtrirni material prevladujoč laminarni tok, kar lahko opišemo z znano Hagen-Poiseuillovo enačbo. Iz Hagen-Poiseuillove enačbe, zapisane v hitrostni obliki, lahko izpeljemo Kozeny-Carmanovo enačbo, ki podaja omenjeno konstanto permeabilnosti filtrirnega materiala. Več o navedenih in omejenih enačbah je na voljo v strokovni literaturi s področja mehanike tekočin ali obravnave procesov filtriranja, ki so ozko povezani z mehaniko tekočin npr. [20], [24], [25], [26].

Razen omenjenih enačb je pri opisu prehajanja tekočine skozi filter in izločanja delcev potrebno upoštevati še druge specifičnosti in vplive faktorjev, ki se nanašajo na fizikalno dogajanje pri filtriranju: od snovnih lastnosti delcev, ki jih izločamo, njihove geometrije, snovnih lastnosti, pa vse do vrste in zgradbe filtrirnega materiala (več o teh parametrih je zapisanega npr. v [8]). Prav tako je zelo pomembno uporabiti ustrezen opis in model mehanizma prestrežanja in izločanja delčkov.

Do sedaj predstavljene enačbe predstavljajo izhodišče za opis toka tekočine skozi porozne medije. Razumevanje tega je nujno potrebno, da lahko razvijemo primerne teorije in enačbe za opis izločanja delcev iz tekočine. Je pa tudi glede ustreznega matematičnega opisa prestrežanja in izločanja delcev možno zaslediti več pristopov.

Običajno se nanašajo na izločanje delcev iz toka plina, na primer delcev v zraku. Tako je bila najprej, kot ena prvih, razvita teorija enega vlakna, ki temelji na Daviesovi teoriji [27] in je služila za opis izločanja aerosolnih delcev iz zračnega toka. Veliko bližje izvedbam hidravličnih filtrov, ki so sestavljeni iz več vlaken, je celični model Kuwabare in Happela, ki omogoča opis dogajanja v primeru dveh sosednjih vlaken. Za model Kuwabare tudi menijo, da je bolj reprezentativen za tok in opis dogajanja okoli vlaken v primeru nizkih Reynold-

sovih števil, kakršna so značilna za pretok tekočine skozi filter. [28]

Možni načini izločanja delcev pri prehajanju tekočine skozi filtrirni material so že bili na kratko predstavljeni v poglavju 2.1. Pri tem gre v glavnem za vpliv vztrajnosti delca, prestrežanje delca in vpliv difuzije. Elektrostatična privlačnost in tovrstno izločanje delca za področje običajnih hidravličnih filtrov nista značilna. Številni raziskovalci bodisi ignorirajo vpliv izločanja zaradi vztrajnosti delcev bodisi jo pripisujejo učinkovitosti načina izločanja s prestrežanjem. Za filtracijo drobnih delcev npr. Kowalski [29] meni, da učinek vztrajnosti ni pomemben za normalne hitrosti tekočine v filterih, majhne delce (vključno v razredu velikosti mikrobov) in ga lahko v večini modelov filtrov zanemarimo, saj ga način prestrežanja zadovoljivo upošteva.

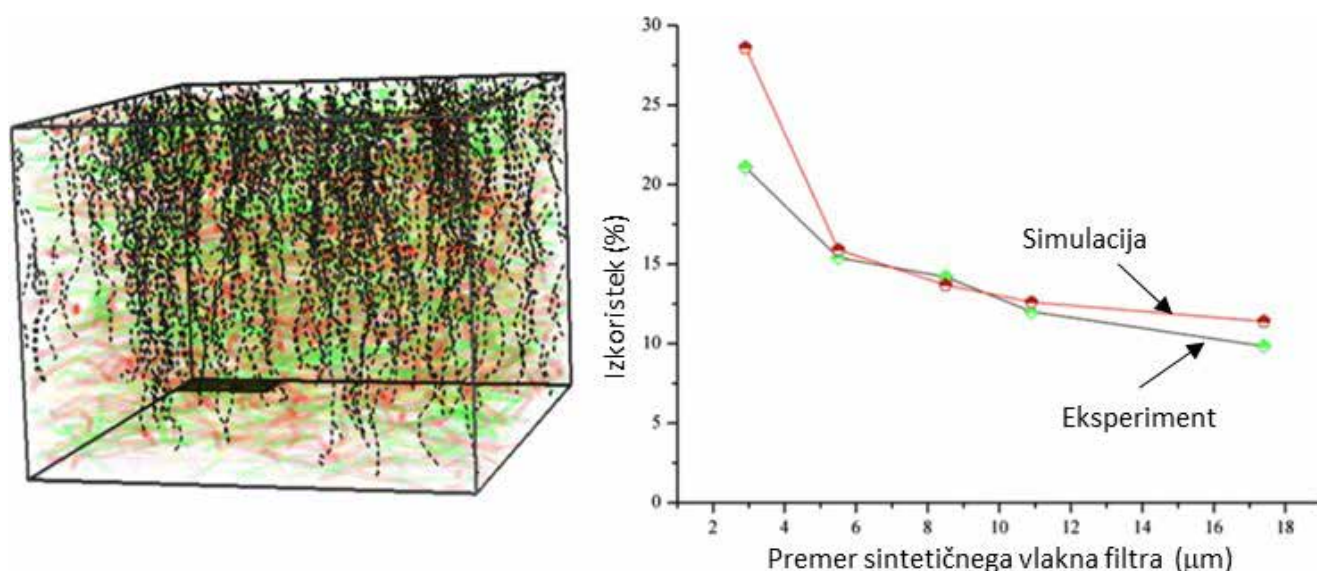
Opisov mehanizmov izločanja delcev iz različnih vrst medija, argumentov za ali proti v določenem primeru je kar veliko in so povzeto ali podrobneje opisani v literaturi, ki se ukvarja s problemom filtracije in opisi procesov. [6] do [10] Glede na vrsto tekočine, ki jo filtriramo, glede na velikost delcev, ki jih želimo izločiti, in glede na njihove snovne lastnosti, glede na uporabljene filtrirne materiale in druge posebnosti filtriranja vidimo, da je ta problematika izredno široka ter specifična in jo je zaradi tega dokaj težko natančno teoretično opisati.

V tem poglavju so zato bila zelo na kratko navedena samo osnovna izhodišča, ki izkazujejo kompleksnost prehajanja tekočine in izločanja delcev. Ker je na klasični matematični način zelo težko oz. skoraj nemogoče dovolj podrobno analizirati dogajanje ob upoštevanju vseh vplivnih faktorjev, razvijalci filtrov zato uporabljajo sodobna orodja za simulacijo fizikalnega dogajanja pri prehajanju tekočine z delci skozi filtrirni material. Ta orodja omogočajo obravnavo široke palete različnih stanj in kombinacij, temeljijo pa na omenjenih enačbah.

3 Numerična simulacija procesa filtriranja

S podrobnim pristopom k problematiki filtriranja se ukvarjajo snovalci in raziskovalci filtrirnih materialov, filtrov in procesov filtriranja, ki si pri tem pomagajo z uporabo zmogljivih orodij za simulacijo dogajanja na področju mehanike tekočin. K temu so v veliki meri pripomogle vedno večja računska moč računalnikov, vse večja dostopnost matematičnih programskih orodij in uporabniku prijazna programska oprema. Tako lahko strokovnjaki najdejo bolj prefinjene, napredne, izpopolnjene in dovršene načine za študije procesa filtracije.

Eno takih orodij je zagotovo računalniška dinamika tekočin (CFD), ki se je uveljavilo kot pomemb-

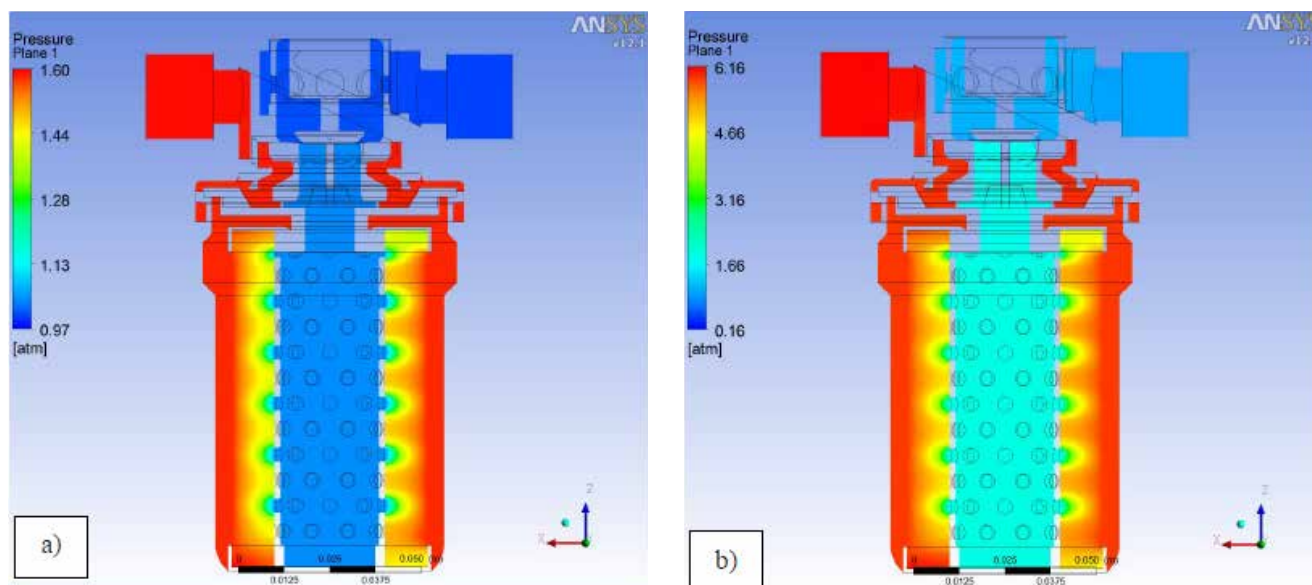


Slika 4 : Učinek filtrirnega materiala – trajektorije in končni položaj ujetega delca [36]

no orodje pri načrtovanju in modeliranju sistemov filtracijskega toka. CFD je programsko orodje, ki omogoča simulacijo dinamike toka tekočine v številnih situacijah, vključno s tokom skozi porozne medije. Omenjena simulacija se izvaja z reševanjem Navier-Stokesovih enačb za ohranitev mase, gibalne količine in energije za tekočino, ki prehaja skozi filter. Enačbe, ki se rešujejo z ustreznimi numeričnimi pristopi v računski dinamiki tekočin, je mogoče približati z diskretno formulacijo. Običajno gre za metodo končnih volumnov, ki je alternativa metodama končnih diferenc in končnih elementov. Zaradi aproksimacij je pogosto potrebno uporabiti empirične metode za opis pojavov, ki za dano stopnjo diskretizacije niso zadovoljivo razrešeni. Tako je npr. možno upoštevati turbulenco tekočine, proces polnjenja filtrirnega materiala z zajetimi delci, učin-

ke poroznega filtrskega materiala, njegovo zgradbo ter različne oblike in snovne lastnosti delcev, ki jih izločamo.

Za uporabo CFD za različne študije s področja filtriranja različnih vrst tekočin in filtrskih materialov je na voljo kar nekaj virov preglednega značaja in vedno večje število objav različnih študij, tako starejšega in predvsem novejšega datuma (npr. [30] do [39]). Tako se študije ukvarjajo z različnimi učinki filtriranja in učinkovitosti filtra, pri čemer so osredotočene na obravnavo različnih vrst filtrirnih materialov (npr. celuloza, sintetična vlakna), z vplivom različnih velikosti vlaken in por ter vplivom različnih tokovnih razmer. Kot primer *slika 4* prikazuje učinek sintetičnega filtrirnega materiala, pot in mesto ujetja delcev v notranjosti filtrirnega materiala ter



Slika 5 : Porazdelitev tlaka v notranjosti filtra pri pretoku 5 l/min (a) in 35 l/min (b) [37]

primerjavo med rezultati simulacije in meritev. [36] Druge študije pa se posvečajo obravnavi filtra kot celovite komponente, pri čemer so v ospredju oblika filtra oz. filtrskega vložka ali pa (tlačne) razmere ob kopičenju delcev v notranjosti filtra, kot to npr. primer prikazuje *slika 5*. [37], [38]

Vsekakor razvoj in uporaba novih numeričnih metod in orodij za modeliranje hidrodinamičnih pojavov pri filtriranju pripomoreta k povečanju učinkovitosti sodobnih filtrov tako glede zadrževanja delcev nečistoč kot količine kopičenja delcev. Zaradi tega je tovrstno orodje nepogrešljiv pripomoček proizvajalcev filtrov pri snovanju učinkovitih sodobnih filtrov.

4 Zaključek

Postopek filtriranja in izločanje neželenih delcev je kompleksen proces. Temu primerno sta tudi teoretični opis dogajanja pri pretakanju tekočine skozi filter in način izločanja delcev kompleksna, saj je potrebno upoštevati vrsto tekočine ali plina, vrsto delcev ter njihove dimenzijske in snovne lastnosti, vrsto filtrirnega materiala in vplive obratovalnih razmer ter okolice. Na teoretični način je vse te vplivne faktorje težko zajeti na enostaven način.

Prispevek podaja vpogled v ozadje fizikalnega dogajanja pretakanja tekočine skozi filtrski material. Podana so fizikalna izhodišča, pregled osnovne literature in enačbe s področja mehanike tekočin, ki podrobno opisujejo pretakanje tekočine skozi filter kot tudi različne mehanizme izločanja delcev. Zaradi kompleksnosti teoretičnega opisa izločanja delcev je za vpogled v notranjost filtra in tamkajšnje dogajanje, namene raziskav in za snovanje filtra, smiselno uporabiti numerično simulacijo. Zmogljiva tovrstna programska orodja omogočajo proizvajalcem filtrov zasnovati učinkovitejše filtre, uporabnikom pa mogoče ponudijo dodatne informacije o tem, s čim se pri raziskavah in snovanju filtrov ukvarjajo proizvajalci filtrov.

Literatura

- [1] Pall: Filtration Fundamentals, Part 1.
- [2] Hydac: Filter Handbook, E 7.011.3/11.16, 22 strani.
- [3] Bensch, L.: Evaluating hydraulic filters when they're under stress, Power & Motion, Nov. 1, 2004.
- [4] Filterproducts: Depth vs. Surface Filtration, <https://filterproducts.com/custom-strainer-solutions/design-resources/depth-filtration/>.
- [5] Green Synergy: Depth vs. Membrane Filters, dosegljivo na: <https://www.greensynergy.my/post/depth-vs-membrane-filter>, 2020.
- [6] Sutherland, K. S.: Filters and Filtration Handbook, Elsevier Science, ISBN-10: 0080972535, ISBN-13: 978-0080972534, 536 strani, 2014.
- [7] Sparks, T., Chase, G.: Filters and Filtration Handbook, Elsevier/Butterworth-Heinemann, 6th Edition, ISBN-10: 0080993966, ISBN-13: 978-0080993966, 444 strani, 2015.
- [8] Hutten, I.: Handbook of Non-Woven filter media, Elsevier, ISBN 1856174417, 477 strani, 2007.
- [9] Ripperger, S., Gösele, W., Alt, Ch., Loewe, T.: Filtration 1 – Fundamentals, doi.org/10.1002/14356007.b02_10.pub 3, 2013.
- [10] Wakeman, R. J., Tarleton, E. S.: Filtration: Equipment Selection, Modelling and Process Simulation, ISBN 1 85617 345 3, Elsevier, 446 strani, 1999.
- [11] Thomas, D., Charvet, A., et. al.: Aerosol Filtration, ISTE Press – Elsevier, ISBN 978-1-78548-215-1, 2017.
- [12] Dépée, A., Lemaître, P. et al.: Laboratory study of the collection efficiency of submicron aerosol particles by cloud droplets – Part I; Influence of relative humidity, Atmospheric Chemistry and Physics 21(9):6945-6962, doi:10.5194/acp-21-6945-2021, 2021.
- [13] Ding, Y., Wu, J., Wang, J., Wang, J., Ye, J., Liu, F.: Superhydrophilic carbonaceous-silver nanofibrous membrane for complex oil/water separation and removal of heavy metal ions, organic dyes and bacteria, Journal of membrane science, Elsevier, Volume 614, doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118491, 2020.
- [14] Chien, H. W., Tsai, M. Y., Kuo, C. J., Lin, C. L.: Well-dispersed silver nanoparticles on cellulose filter paper for bacterial removal, Nanomaterials, 11(3), 595, doi.org/10.3390/nano11030595, 2021.
- [15] Deng, Y., Lu, T., Cui, J., et al.: Bio-based electrospun nanofiber as building blocks for a novel eco-friendly air filtration membrane: A review, Separation and Purification Technology, Volume 277, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119623>, 2021.
- [16] Lastow, O., Podgorski, A.: Single Fiber Collection Efficiency (Chapter 3), Advances in Aerosol Filtration, Editor Spurny, K., Lewis Publishers, strani 24, 1998.
- [17] Wakeman, R. J., Tarleton, E. S.: Filtration: Equipment Selection, Modeling and Process Simulation, Elsevier, 1999.
- [18] Happel, J.: Viscous Flow in Multiparticle Systems: Slow Motion of Fluid Relative to Beds of Spherical Particles, AIChE J., Vol. 4, pp. 197-201, 1958.
- [19] Happel, J., Brenner, H.: Low Reynolds Number Hydrodynamics, Prentice-Hall, 1965.
- [20] Škerget, L.: Mehanika tekočin, Fakulteta za strojništvo Maribor in Fakulteta za strojništvo Ljubljana, ISBN 0196-8904, 337 strani, 1994.
- [21] Lovrec, D.: Fizikalno ozadje delovanja hidravličnih sistemov, Univerzitetna založba UM, ISBN 978-961-286-193-3, 208 strani, 2018.
- [22] Kothandaraman, C. P., Rudramoorthy, R.: Fluid Mechanics and Machinery, 2nd edition, New Age International Publishers, ISBN (13): 978-81-224-2558-1, 615, 2007.

- [23] Streeter, V., Wylie, B.: Fluid Mechanics, MacGraw-Hill Inc., 9. Edition, 586, 1989.
- [24] Bird, R., Byron, S., Warren, E., Lightfoot, E. N.: Transport Phenomena, J. Wiley & Sons, Inc., 1960.
- [25] Hibbeler, R.: Fluid Mechanics, 2nd Edition, Pearson; 2nd edition, 912 strani, ISBN-10: 013464929X, ISBN-13: 978-0134649290, 2017.
- [26] Gerhart, P. M., Gerhart, A. L., et. all: Munson, Young and Okiishi's Fundamentals of Fluid Mechanics, 9th Edition, Wiley, 800 pages, ISBN-10: 1119597307, ISBN-13: 978-1119597308, 2020
- [27] Davies, C. N.: Air filtration, Academic Press, 1973.
- [28] Kuwabara, S.: The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in viscous flow at small Reynolds numbers, *Phy. Soc. Japan*, No. 4, strani 527-532, 1959.
- [29] Kowalski, W. J., Bahnfleth, W. P., Whittam T. S.: Filtration of airborne microorganisms: Modeling and Predictions, *ASHRAE* 1999, strani 1-23, 1999.
- [30] Chen, C., Lim, L., Stephenson, P.: Application of Computational Fluid Dynamics to Air Induction System Design, *AFS Adv. Filtr. Sep. Technol.*, Vol. 12, strani 65-69, 1998.
- [31] Keir, G., Jegatheesan, V.: A review of computational fluid dynamics applications in pressure-driven membrane filtration. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol* 13, strani 183-201, doi.org/10.1007/s11157-013-9327-x, 2014.
- [32] Qian, F., Huang, N. Lu, J., Han, Y.: CFD-DEM simulation of the filtration performance for fibrous media based on the mimic structure, *Computers & Chemical Engineering*, Elsevier, Volume 71, strani 478-488, doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.09.018, 2014.
- [33] Dzhonova-Atanasova, B. D., Tsibranska, I. H., Paniovskas, S. P.: CFD Simulation of Cross-Flow Filtration, *Chemical Engineering* vol. 70, strani 2041 - 2046, doi: 10.3303/CET1870341, 2018.
- [34] Li, H., Sansalone, J.: Multi-scale physical model simulation of particle filtration using computational fluid dynamics, *Journal of Environmental Management*, Elsevier, doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111021, 2020.
- [35] Bai, H., Qian, X., Fan, J. et. all: Theoretical Model of Single Fiber Efficiency and the Effect of Microstructure on Fibrous Filtration Performance: A Review, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2021, 60, 1, strani 3-36, https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04400, 2021.
- [36] Pan, Z., Liang, Y., Tang, M. et all: Simulation of performance of fibrous filter media composed of cellulose and synthetic fibers, *Cellulose*, 26, strani 7051-7065, doi.org/10.1007/s10570-019-02605-8, 2019.
- [37] Konstantinov, S. Y., Tselishev, D. V., Tselishev, V. A., Tuk, D. E.: Numerical Simulation of Hydraulic Screen Filter, *Samara*, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/DVM55487.2022.9930907, International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), 2022.
- [38] Korkmaz, Y. S., Kibar, A., Yigit, K. S.: Experimental and Numerical Investigation of Fluid Flow in Hydraulic Filters, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 15, No. 2, pp. 363- 371, ISSN, doi.org/10.47176/jafm. 15.02.32898, 2022.
- [39] Ando, S., Nishikawa, M., Kaneda, M., Suga, K.: Numerical simulation of filtration processes in the flow-induced deformation of fibrous porous media by a three-dimensional two-way fluid-structure interaction scheme, *Chemical Engineering Science* 252, 15 strani, doi.org/10.1016/j.ces.2022.117500 0009-2509, 2022.

Physical background of hydraulic fluid flow through a filter

Abstract:

Filtering or removing unwanted solid particles from the medium we want to clean, be it different gases or liquids, is a very complex process. This is already evident in the basic terms related to the type, material and shape of the filter and the filtering process. This is especially evident in the in-depth knowledge of the physical background of the liquid passing through the filter, the mechanisms of the elimination of unwanted particles, and in the modelling and simulation of this process. Despite the complexity, this knowledge is essential when designing suitable filter materials and entire filter. The latter is usually the domain of manufacturers of filter materials and filters and those engaged in research related to the field of filtration.

The contribution gives in more detail the background of the process of hydraulic fluid passing through the filter. In the introduction, general information related to filtering methods and types of filters, especially those suitable for filtering hydraulic fluids and known to every operator of hydraulic or lubrication systems, is given. In the following, the physical background of the passage of liquid through the filter, various mechanisms of the elimination of unwanted particles, and the approach to mathematical modelling and numerical simulation as an effective tool for studies related to the issue of filtering are presented in more detail. The cited sources of research and studies and insights enable users to better understand these processes, and provide filter developers with a basis for designing an effective filter.

Keywords:

hydraulic filters, fluid passing, particle elimination methods, physical equations, numerical simulation