

Optimizacija rotacijskega izločevalnika za vodne sesalnike

Gašper BENEDIK, Igor MARKIČ, Aljoša MOČNIK, Brane ŠIROK, Marko HOČEVAR, Janez RIHTARŠIČ

Povzetek: Naloga rotacijskega izločevalnika v vodnih sesalnikih je ločevanje zraka od vodnih kapljic in prašnih delcev. V prispevku je predstavljena optimizacija obstoječega izločevalnika za doseganje boljšega aerodinamičnega izkoristka ter stopnje ločevanja zraka od vodnih kapljic in omočenih prašnih delcev. Optimizacija je temeljila na numeričnih simulacijah CFD, na aerodinamičnih meritvah integralnih in lokalnih lastnosti sesalne enote z izločevalnikom ter na meritvah stopnje izločanja izločevalnika v različnih delovnih točkah. Meritve novega izločevalnika so pokazale najboljše aerodinamične karakteristike ter primerljivo stopnjo izločanja z najboljšimi izločevalniki na trgu.

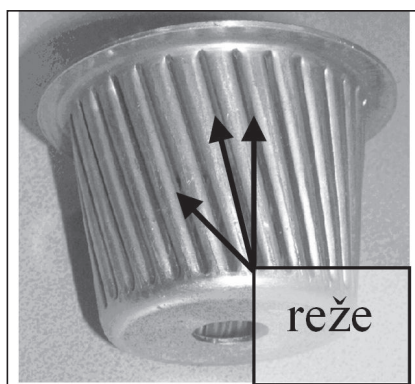
Ključne besede: rotacijski izločevalnik, vodni sesalnik, stopnja izločanja, aerodinamski izkoristek, optimizacija,

1 Uvod

V zadnjih letih narašča uporaba vodnih sesalnikov v gospodinjstvu in industriji. Voda predstavlja filter za prašne delce, saj se večina delcev omoči oziroma sprime z vodo. Vodni sesalniki z izločevalnikom so sesalniki višjega cenovnega razreda s ceno med 300 € in 2000 €. Glavni prednosti vodnih sesalnikov sta: dobro izločanje finih prašnih delcev in konstantna moč sesanja, saj ni vpliva polnosti vrečke s prahom. Izločanje vode in preostalih prašnih delcev nastopi pred vstopom v sesalno enoto, ki je sestavljena iz elektromotorja in centrifugalnega puhala.

Zahtevano stopnjo izločanja je možno doseči na različne načine z mehanskimi

Gašper Benedik, univ. dipl. inž., Igor Markič, univ. dipl. inž., Aljoša Močnik, univ. dipl. inž., vsi Domel, d. d., Železniki; Prof. dr. Brane Širok, univ. dipl. inž., doc. dr. Marko Hočevar, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; Janez Rihtaršič, univ. dipl. inž., Domel, d. d., Železniki



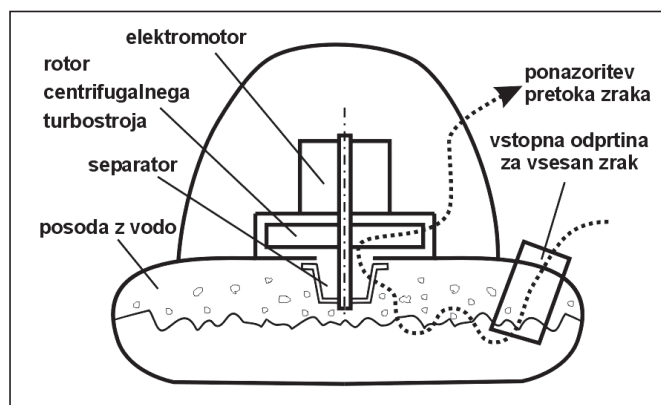
Slika 1. Primer rotacijskega izločevalnika, vstopanje toka zraka poteka skozi podolžne reže

in centrifugalnim puhalom je nameščena na zgornji del rotacijskega izločevalnika.

Primer rotacijskega izločevalnika je prikazan na *sliki 1*. Rotacijski izločevalnik zaradi vrtenja s 15 000 do 35 000 vrtljajev/min deluje na delce vode in prahu v toku vstopajočega zraka v sesalno enoto s centrifugalno silo in jim preprečuje vstop v izločevalnik. Lastnosti dobrega izločevalnika so: dober aerodinamični izkoristek, dobro izločanje vode in prašnih delcev, zadostna mehanska trdnost ter minimalno nabiranje prahu na stenah izločevalnika.

izločevalniki, rotacijskimi izločevalniki, vodnimi zavesami itd. V prispevku predstavljamo proces optimizacije rotacijskega izločevalnika, ki bo vgrajen na mokri sesalni enoti Domel 467.

Sesalna enota z elektromotorjem



Slika 2. Shematski prikaz vodnega sesalnika z vgrajenim rotacijskim izločevalnikom

Na *sliki 2* je predstavljen tok zraka skozi vodni sesalnik. Umazan vse-sani zrak vstopi v posodo vodnega sesalnika, kjer se delno očisti z vodo oziroma se prašni delci vežejo na vodo v posodi. Zrak nadaljuje pot skozi rotacijski izločevalnik, kjer se izločijo vodni in prašni delci, v centrifugalno puhalo sesalne enote, nato pa skozi difuzorsko kaskado in izstopni koaksialni kanal izstopi v okolico. Pri nekaterih izvedbah imajo vodni sesalniki pred izstopom zraka v okolico vgrajen še suhi filter, s katerim je mogoče še dodatno očistiti zrak pred izstopom v okolico. Izločevalnik je nameščen na spodnjem delu sesalne enote in se vrti z vrtilno frekvenco elektromotorja.

Pred optimizacijo smo opravili obsežen pregled patentov. Oblika izločevalnika je pri vseh boljših izločevalnikih zaščitena z mednarodnim patentom, kar pomeni dodatno omejitev pri njegovem razvoju. Večina mednarodnih prijav patentov je bila objavljena v zadnjih desetih letih, kar potrjuje intenziven razvoj na tem področju [14, 15, 16].

Cilj optimizacije je izboljšati izkoristek sesalne enote z izločevalnikom ter izboljšati stopnjo ločevanje zraka od vodnih kapljic in prašnih delcev. Optimizacija je bila izvedena s simulacijami CFD in integralnimi ter lokalnimi meritvami zračnega toka sesalne enote z izločevalnikom.

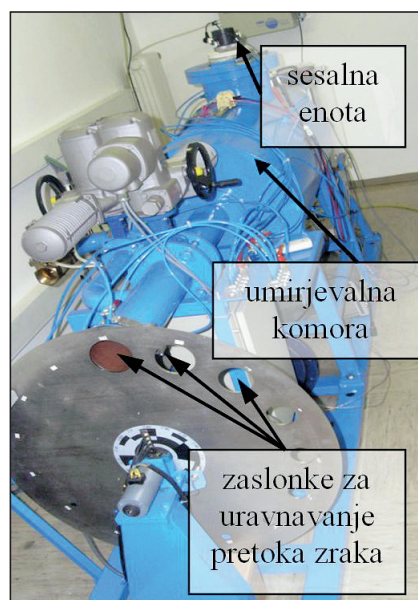
2 Opis eksperimenta

Poglavje zajema opis integralnih meritev zračnega toka sesalne enote z izločevalnikom, opis lokalnih meritev zračnega toka v okolici izločevalnika v različnih delovnih točkah obratovanja sesalnika ter opis meritev stopnje izločanja. Delovne točke sesalnika so določene ob znani izmerjeni integralni karakteristiki z volumenskim pretokom zraka skozi sesalnik.

2.1 Lokalne meritve zračnega toka

Integralne meritve zračnega toka obsegajo meritve skupnega izkoristka v

odvisnosti od volumenskega pretoka sesalne enote z izločevalnikom [2]. Meritve so narejene na merilni postaji (*slika 3*), ki omogoča merjenje integralnih meritev zračnega toka sesalnih enot po standardu IEC 60312 [6]. Za zajem merjenih veličin (tlak, temperatura, izmenične električne veličine ...) so uporabljeni merilni pretvorniki, ki so povezani z osebnim računalnikom z analogno digitalnim pretvornikom. Pri meritvah je mogoče nastavljati volumenski pretok zraka skozi merilno postajo z merilnimi zaslonkami (*slika 3*). Posamezna meritev poteka pri omrežni napetosti 230 V in traja 10 s.



Slika 3. Merilna naprava za merjenje integralnih karakteristik sesalnih enot

Izračun volumenskega pretoka zraka

Volumenski pretok zraka Q izračunamo na podlagi merjenja tlaka pred in za zaslonko ter premera zaslonke. Zaradi spreminjajočih parametrov zraka v laboratoriju (vlažnost, temperatura, barometrični tlak) standard predpisuje uvedbo korekcijskega faktorja, ki omogoča preračun karakteristik sesalnih enot na standardne pogoje zraka v atmosferi.

Izračun skupnega izkoristka sesalne enote

Skupni izkoristek sesalne enote je podan z razmerjem izhodne aerodi-

namične moči P_{aire} in vhodne električne moči sesalne enote P_1 :

$$\eta = \frac{P_{aire}}{P_1} = \frac{Q \cdot \Delta p}{P_1}, \quad (1)$$

kjer je Q izmerjeni volumenski pretok zraka skozi sesalno enoto z izločevalnikom in Δp tlačna razlika.

Merilna negotovost

Relativna merilna negotovost pri meritvi volumenskega pretoka Q znaša do 3 % glede na vsakokratno izmerjeno vrednost. Absolutna merilna negotovost pri meritvi izkoristka η sesalne enote z izločevalnikom znaša do 1 %.

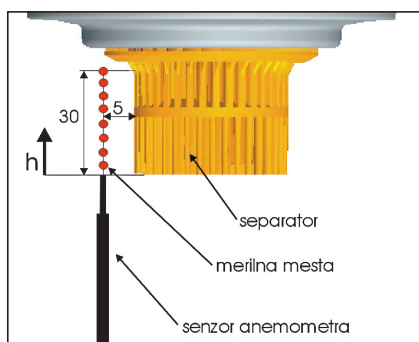
2.2 Lokalne meritve zračnega toka

V laboratoriju LVTS (Laboratorij za vodne in turbinske stroje) na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani smo opravili lokalne meritve vstopne hitrosti zračnega toka po višini izločevalnika [1]. Hitrost zračnega toka smo merili z anemometrom na vročo žičko Dantec Mini CTA s tipalom Dantec 55P11. Tipalo in anemometer omogočata enodimenzionalno merjenje pravokotne projekcije hitrosti toka zraka glede na žičko tipala anemometra. Tipalo anemometra je bilo med meritvami orientirano tako, da je merilo vstopno hitrost zračnega toka ali meridiansko hitrost, to je vektorsko vsoto radialne in aksialne hitrosti. Na *sliki 4* so označena merilna mesta, kjer je bilo tipalo anemometra med meritvijo. Izbrali smo deset merilnih mest po višini h . Merilna mesta so bila nameščena na premici, vzporedni osi sesalnika in oddaljeni 5 mm od roba izločevalnika v radialni smeri. Tipalo anemometra je bilo okrog osi zavrnjeno tako, da je bila žička tipala anemometra postavljena tangencialno glede na obod izločevalnika. Med meritvami sta bila sesalna enota in izločevalnik vgrajena v testni sesalnik, delovne točke pa smo zagotavljali z ustreznimi zaslonkami, ki smo jih namestili na vstopu v sesalnik.

Meritve lokalnih hitrosti zračnega toka smo vedno opravili pri suhem delovanju sesalnika.

Anemometer je bil pred meritvijo umerjen na postaji za umerjanje anemometrov [1]. Temperaturo toka za korekcijo izmerjenih vrednosti napetosti iz anemometra na vročo žičko smo med meritvijo in med umerjanjem merili na vstopu zraka v sesalnik z uporovnim tipalom Pt-100 razreda natančnosti A s štirižilno priključitvijo. Merilna negotovost meritve temperature je znašala največ 0,4 °C.

Sesalnik s sesalno enoto je bil priključen na napetostni vir, s katerim smo zagotavljali na priključnih sponkah sesalne enote izmenično omrežno napetost 230 V.



Slika 4. Vstopno hitrost zračnega toka smo merili na desetih merilnih mestih v oddaljenosti 5 mm od izločevalnika

2.3 Meritev stopnje izločanja

Stopnjo izločanja smo vrednotili kot razmerje mase vode in mase zraka, ki ju prepusti izločevalnik. Meritev je potekala po naslednjem postopku. V sesalnik smo vgradili izbrano sesalno enoto. V posodo smo natočili vodo in jo stehali (m_1). Vkllopili smo sesalnik in ga pri izbrani zaslonki pustili vklopljenega izbrani čas t . Na koncu smo stehali posodo s preostalo vodo m_2 . Stopnja izločanja je definirana z enačbo:

$$S = \frac{m_{\text{zraka}}}{m_{\text{vode}}} = \frac{Q \cdot t \cdot \rho_{\text{zraka}}}{m_1 - m_2}, \quad (2)$$

kjer Q predstavlja izmerjeni volumenski pretok in ρ_{zraka} gostoto zraka. Morebitno negotovost meritve stopnje izločanja lahko pripišemo segrevanju sesalne enote, ki se odraža v spremembi volumenskega pretoka sesalnika Q . Prav tako je del meril-

ne negotovosti prispevalo tehtanje, nihanje temperature ter meritev časa delovanja sesalnika. Med meritvami je bil raztros manjši od 5 %.

3 Opis numerične simulacije

Za izračun toka fluida skozi izločevalnik smo uporabili programski paket Fluent ver. 6.2. Programski paket sloni na metodi končnih volumnov [11]. Mrežo modela smo generirali s programskim paketom Gambit ver. 2.3., ki nam omogoča generiranje strukturirane, nestrukturirane in hibridne mreže različnih oblik in velikosti [12].

Geometrija izločevalnika

Na podlagi nekoliko poenostavljenega 3D modela izločevalnika smo izdelali negativ obravnavanega področja, ki predstavlja volumen fluida. Numerični model geometrije predstavlja volumen fluida na vstopu, volumen toka zraka pri lopaticah ter volumen fluida znotraj in na izstopu iz izločevalnika. Glede na periodično zasnovo modela smo modelirali le 1/2 oz 1/6 volumna izločevalnika.

Mreženje modela

Volumen fluida na vstopu ter med lopaticami izločevalnika smo mrežili s strukturirano mrežo, notranost izločevalnika pa zaradi kompleksnejše geometrije z nestrukturirano mrežo in z jedrom »hex« [12]. Mreža prvega prototipa, ki predstavlja 1/6 celotnega modela, je vsebovala 466 000 elementov in 364 000 vozlišč, mreža končnega prototipa, ki predstavlja 1/2 celotnega modela, pa je bila sestavljena iz 806 000 elementov in 569 000 vozlišč.

Numerični model simulacije

Pri analizi toka smo uporabili množico povprečenih Reynolds-Navier-Stoksovih enačb (RANS), ki popisujejo ohranjanje mase in gibalne količine v toku. Sistem enačb RANS smo reševali z modelom turbulence SST $k-\omega$ [7]. Ta združuje model $k-\omega$ ter $k-\epsilon$. V območju mejnih plasti velja robustni standardni model $k-\omega$, medtem ko

se v območju prostega toka uporabi računsko manj zahtevni model $k-\epsilon$.

Zaradi vrtenja izločevalnika smo uporabili t. i. »Multi-Reference-Frame« model (MRF), ki rešuje sistem enačb v relativnem, vrtečem se koordinatnem sistemu. To omogoča boljšo konvergenco enačb pri močnejšem vrtenju. Uporabili smo stisljiv model idealnega plina v povezavi s Southerlandovim modelom viskoznosti. Zaradi kompleksnosti oblike sistema smo uspeli doseči konvergentnost analize pri standardni diskretizaciji tlaka in metodi »upwind« prvega reda natančnosti diskreditizacij za gostoto, gibalno količino, energijo in turbulentne parametre.

Konvergenčni pogoj je bil izpolnjen, ko je bila razlika masnega toka med vstopom in izstopom manjša od 0,2 % ter so se iteracije vrednosti masnega toka na izstopu in tlaka na vstopu med iteracijami spreminjale manj od izbrane vrednosti.

Robni pogoji

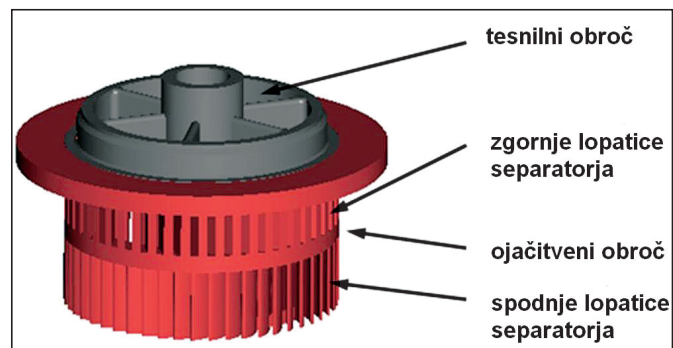
Vrednost robnih pogojev smo določili na podlagi opravljenih meritev. Na zunanjem vstopnem robu smo predpisali vrednost vstopnega masnega pretoka, na izstopu iz izločevalnika pa smo predpisali vrednost tlaka sesalne enote. Na vstopu in izstopu smo predpisali tudi intenzivnost turbulentnosti toka ter vrednosti hidravličnega premera. Za volumen med lopaticami ter znotraj izločevalnika smo določili še smer in velikost vrtilne frekvence. Prerezne površine smo definirali kot vrteče se in periodične.

4 Rezultati numeričnega modela in meritev ter optimizacija

Vsebina poglavja obsega prikaz optimizacije rotacijskega izločevalnika. Opisana sta obstoječi izločevalnik pred optimizacijo ter novi izločevalnik po optimizaciji, ugotovitve pa so podkrepljene z meritvami in numeričnimi simulacijami. Novi izločevalnik mora imeti čim boljšo stopnjo ločevanja vode in prašnih delcev od zraka

(enačba 2) ter čim večji aerodinamični izkoristek sesalne enote (enačba 1).

4.1 Obstoječi izločevalnik



Slika 5. 3D model obstoječega izločevalnika

V tem delu je predstavljen obstoječi izločevalnik. Konstruktivski rešitev je bila izbrana kot najustreznejša na podlagi vrednotenja štirih variant izločevalnikov [5, 10]. Mere izločevalnika (višina, premer) so bile določene z enačbo separacije [3, 4, 10].

Na sliki 5 je prikazan model obstoječega izločevalnika. Ojačitveni obroč je nameščen med zgornjim in spodnjim profilom lopatic. Z obročem smo želeli zagotoviti zadostno mehansko trdnost izločevalnika. Z različno nagnjenostjo lopatic izločevalnika nad in pod obročem naj bi zagotovili enakomerno vstopno hitrost zračnega toka po višini izločevalnika, kar naj bi dalo dobre aerodinamične karakteristike in visoko stopnjo izločanja. Naloga tesnilnega obroča je tesnenje med izločevalnikom in centrifugalnim puhalom sesalne enote.

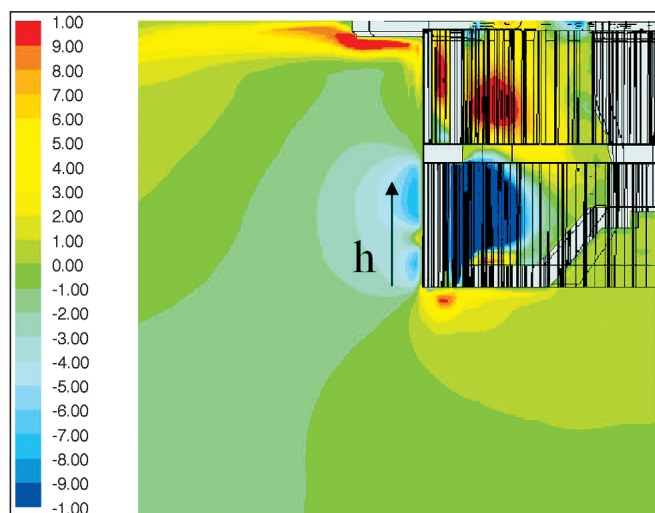
Prikazani izločevalnik s tesnilnim obročem prikazuje prvo izhodiščno delujočo rešitev v fazi načrtovanja in optimizacije, ki pa ni dosegla želenih aerodinamičnih izkoristkov in stopnje izločanja, kar je opisano v nadaljevanju. Namen raziskave funkcionalnih lastnosti tega izločevalnika je bil predvsem dobiti izhodišča za oblikovanje in uvajanje izboljšav pri optimizaciji.

Rezultat numerične simulacije novega izločevalnika

Sledi opis rezultatov simulacije CFD novega izločevalnika. Natančnejši

opis, kako je bila simulacija izvedena, je v poglavju 3. Simulacija CFD je narejena za masni pretok, ki znaša 70 % maksimalnega pretoka, ki ga doseže nedušena sesalna enota z izločevalnikom.

Rezultat simulacije CFD je predstavljen na sliki 6. Rezultati so podani kot vstopna hitrost zračnega toka v izločevalnik z normirano relativno skalo z vrednostmi hitrosti toka med 0 in 1. Iz simulacije smo ugotovili, da je vstopna hitrost zračnega toka v izločevalnik, odvisna od višine h (slika 6), neenakomerna. Višja je v zgornjem delu izločevalnika ob steni sesalnika, kar ima za posledico slabši aerodinamični izkoristek ter slabšo stopnjo izločanja. Tok zraka z lokalno visoko hitrostjo vstopanja premaga centrifugalno silo na delec v separatorju in prenese nečistoče skozi izločevalnik in sesalno enoto nazaj v okolico. Stopnja izločanja je največja, če dosežemo ob konstantni vrtilni frekvenci izločevalnika nizko vstopno hitrost toka v izločevalnik oziroma če je ta po vsej vstopni površini enakomerna. Visoka hitrost toka ob steni sesalnika tudi poveča tlačne izgube. Opazno je tudi vrtnčenje zraka v notranjosti izločevalnika, kar še zmanjša



Slika 6. Vstopna hitrost zračnega toka v novi izločevalnik se spreminja po višini izločevalnika

dico slabši aerodinamični izkoristek ter slabšo stopnjo izločanja. Tok zraka z lokalno visoko hitrostjo vstopanja premaga centrifugalno silo na delec v separatorju in prenese nečistoče skozi izločevalnik in sesalno enoto nazaj v okolico. Stopnja izločanja je največja, če dosežemo ob konstantni vrtilni frekvenci izločevalnika nizko vstopno hitrost toka v izločevalnik oziroma če je ta po vsej vstopni površini enakomerna. Visoka hitrost toka ob steni sesalnika tudi poveča tlačne izgube. Opazno je tudi vrtnčenje zraka v notranjosti izločevalnika, kar še zmanjša

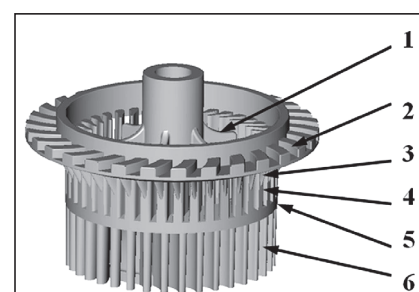
izkoristek sesalne enote z izločevalnikom ter poveča nalaganje nečistoč na stene izločevalnika.

Na podlagi rezultatov numerične simulacije smo iskali konstrukcijsko rešitev, kjer bo vstopna hitrost zračnega toka po celotni višini h čim bolj enakomerna. S tem bo zagotovljena enakomerna in visoka stopnja izločanja po celotni vstopni površini izločevalnika.

4.2 Novi izločevalnik

Optimizacija je temeljila na rezultatih numeričnih simulacij CFD, meritev integralnih in lokalnih lastnosti zračnega toka sesalne enote z izločevalnikom v različnih delovnih točkah ter meritev stopnje izločanja izločevalnika. Izboljšanje izkoristka sesalne enote z izločevalnikom je predstavljeno v poglavju 4.3. Stanje, prikazano v tem poglavju, je bilo doseženo z več iteracijami. Prikazana je le končna rešitev.

Na podlagi rezultatov simulacije CFD obstoječega izločevalnika smo izvedli naslednje konstrukcijske spremembe, s katerimi smo dosegli izboljšanje aerodinamičnega izkoristka izločevalnika in dosegli višjo stopnjo izločanja vode in prašnih delcev (slika 7). Vse opisane spremembe so prvič uporabljene in opisane s patentnimi zahtevami [13]:



Slika 7. 3D model novega izločevalnika

1. Notranje lopatice, ki preprečujejo vrtnčenje toka in zmanjšujejo prisotnost koherentnih osonsimetričnih vrtnčnih struktur znotraj izločevalnika ter predvrtilijo zrak pred vstopom v sesalno enoto [8, 9].
2. Tesnenje z ustvarjanjem protitoka in vrtenja zraka s posebnim tesnilnim elementom v obliki centrifugalne kaskade.
3. Dodatna rebra za izboljšano izločanje.
4. Optimirana oblika lopatic v zgornjem delu izločevalnika tako, da predstavlja zadosten upor toku zraka [9].
5. Poševen tesnilni obroč, katerega naklon se ujema z naklonom obtekačnega zraka.
6. Oblika lopatic z minimalnim aerodinamičnim uporom v spodnjem delu izločevalnika [9].

Prednost novega izločevalnika je tudi enostavna izdelava iz enega kosa z orodjem s klasičnimi kokilami ter izboljšana mehanska trdnost ulitka.

Numerične simulacije novega izločevalnika

V tem delu so predstavljeni rezultati simulacij CFD vstopnih hitrosti zračnega toka v novi izločevalnik. Simulacija CFD je narejena za masni pretok, ki znaša 70 % maksimalnega pretoka, ki ga doseže nedušena sesalna enota z izločevalnikom.

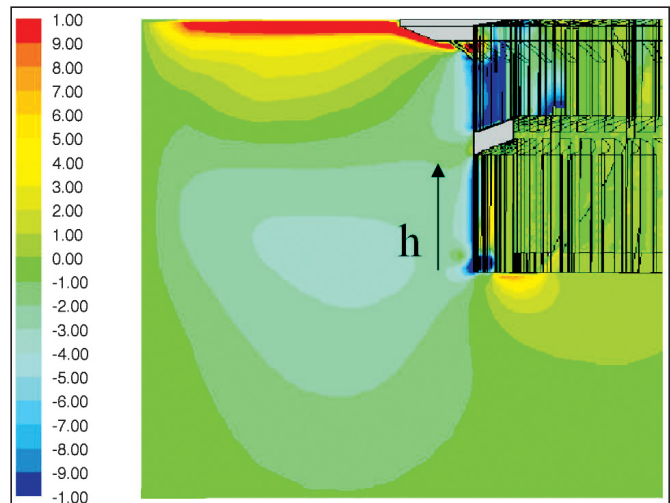
Iz slike 8 je razvidno, da je vstopna hitrost zračnega toka v odvisnosti od višine izločevalnika h skoraj konstantna. Na podlagi rezultatov simulacij pričakujemo izboljšanje aerodinamičnega izkoristka ter stopnje izločanja v primerjavi z obstoječim izločevalnikom. Velika hitrost na vrhu izločevalnika ob steni sesalnika je posledica povratnega toka, ki služi tesnjenju, in je dosežena s centrifugalno kaskado (slika 7, poz. 2).

4.3 Rezultati integralnih meritev izkoristka in stopnje izločanja

V tem poglavju bomo predstavili meritve izkoristka in stopnje izločanja izločevalnikov v primerjavi s konkurenčnimi rešitvami.

Konkurenčne rešitve predstavljajo štirje najbolj priznani sesalniki z izločevalniki na trgu, v nadaljevanju jih bomo označevali z A, B, C in D. Rezultate izkoristka bomo predstavili v normirani obliki z izkoristkom v intervalu med 0 in 1, pri čemer predstavlja vrednost 1 največji doseženi izkoristek najboljše sesalne enote z izločevalnikom v eni delovni točki.

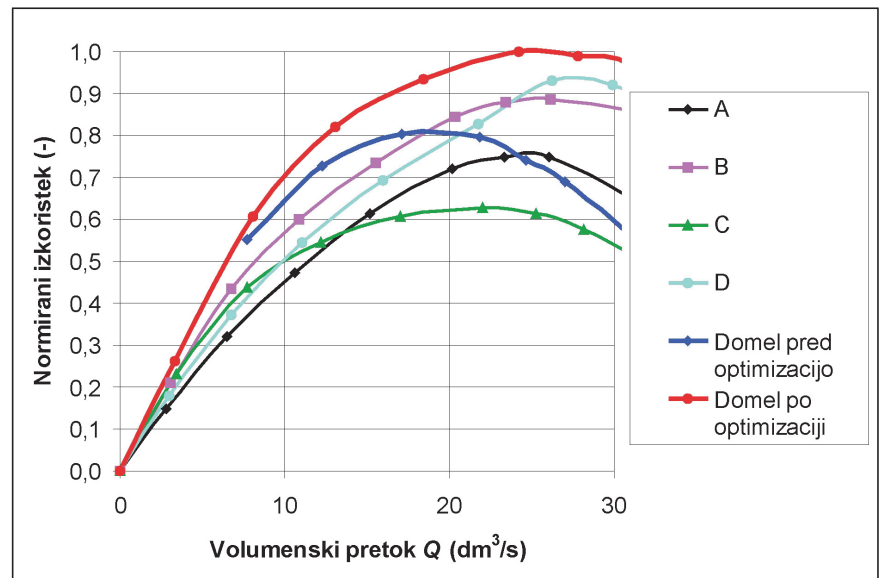
V območju volumenskega pretoka do 30 dm³/s ima sesalna enota 467 z novim izločevalnikom najboljši izkoristek (slika 9). V primerjavi z



Slika 8. Vstopna hitrost zračnega toka v novi izločevalnik po višini h je skoraj konstantna

pretokom, kjer sesalniki največkrat obratujejo.

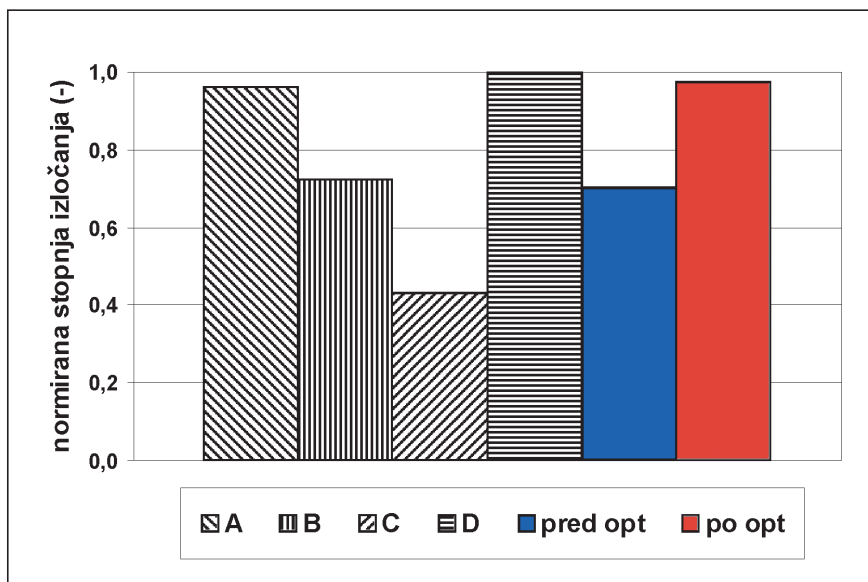
Slika 10 prikazuje stopnjo izločanja (enačba 2), ki je sorazmerna razmerju mase prepuščene vode in mase prepuščenega zraka skozi sesalnik v delovni točki sesalnika. Rezultati so



Slika 9. Izkoristki novega izločevalnika v odvisnosti od volumenskega pretoka v primerjavi s konkurenčnimi izdelki A, B, C in D

obstoječim izločevalnikom smo dosegli do 12-odstotni dvig izkoristka v delovnem področju sesalnika. Poudariti je treba, da sesalnik običajno deluje v območju volumenskih pretokov med 15 dm³/s in 30 dm³/s, odvisno od uporabljenega sesalnega nastavka, oblike tal in strukture površine tal. To pomeni, da se je vrh izkoristka pri novem izločevalniku Domel premaknil k volumenskim

normirani, najboljši rezultat je normiran na vrednost 1. Z optimizacijo smo zmanjšali količino prepuščene vode skozi izločevalnik in dosegli podobne rezultate kot najboljša konkurenčna izdelka A in D. Vzrok za izboljšanje je enakomerna vstopna hitrost zračnega toka po višini izločevalnika, kar je razvidno iz rezultatov analize CFD (slika 8) ter v nadaljevanju iz rezultatov meri-



Slika 10. Rezultati meritev stopnje izločanja izmerjenih izločevalnikov

tev vstopne hitrosti zračnega toka v izločevalnik.

4.4 Primerjava rezultatov numerične simulacije in meritev vstopne hitrosti zračnega toka

Meritve hitrosti vstopanja zračnega toka po višini izločevalnika so bile opravljene v skladu z opisom v poglavju 2. Izmerjena je bila hitrost vstopanja zračnega toka v_v po višini izločevalnika h v meridianski smeri (slika 11). V nadaljevanju so prikazani rezultati meritev in primerjava z vrednostmi, izračunanimi z modelom CFD (slika 8). Vrednosti hitrosti so normirane na interval med 0 in 1,

Najprej si oglejmo rezultate, pridobljene z meritvijo. Velikost in odvisnost hitrosti vstopanja zračnega toka od višine sta odvisni od delovne točke sesalnika, ki je definirana z vrednostjo volumenskega pretoka zraka skozi sesalno enoto. Pri maksimalnih volumenskih pretokih večji del zraka vstopa v izločevalnik v zgornjem delu izločevalnika (100 % največjega volumenskega pretoka; $15 \text{ mm} < h < 24 \text{ mm}$). Pri manjših volumenskih pretokih je večja hitrost vstopanja zračnega toka v spodnjem delu izločevalnika (63 % največjega volumenskega pretoka). Vzrok temu je povečevanje vrtilne frekvence sesalne enote z manjšanjem volumen-

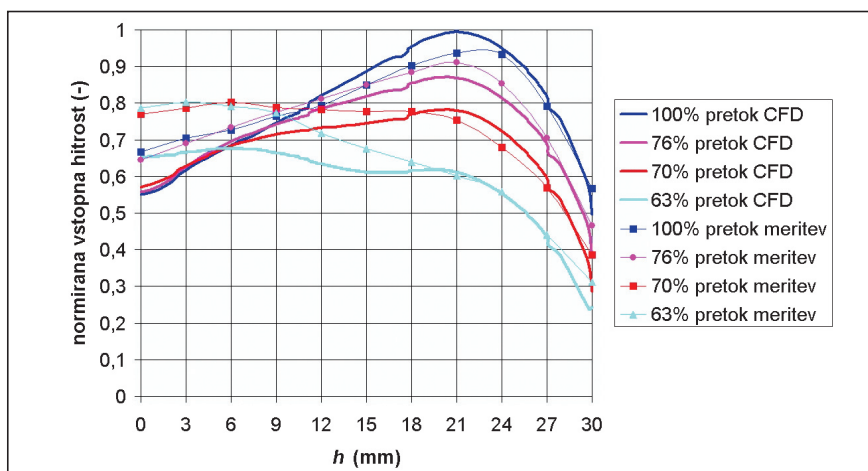
lopatic še težje prehaja skozi zgornji del izločevalnika. Posledično vstopa več zraka pri visoki vrtilni frekvenci skozi spodnji del izločevalnika (63 % največjega volumenskega pretoka). Hitrost vstopanja zračnega toka v delu tik ob sesalni enoti je 0 m/s ($h = 32 \text{ mm}$), k tej vrednosti po pričakovanih sodijo tudi zgornje izmerjene vrednosti na sliki ($h > 27 \text{ mm}$).

Rezultati numeričnih simulacij prikazujejo podobne trende, kot smo jih razbrali iz rezultatov meritev. Ujemanje med simulacijo in eksperimentom je precejšnje v zgornjem delu izločevalnika ($h > 15 \text{ mm}$). V spodnjem delu izločevalnika kažejo rezultati, dobljeni s simulacijo, večje hitrosti. Razhajanje je večje pri majhnih volumenskih pretokih in znaša do 20 %.

Neujemanje med rezultati numeričnega modela in meritev lahko pripišemo negotovostima meritve in simulacije. Možni vzroki za negotovost meritve so nenatančno pozicioniranje merilne sonde, negotovost pri umerjanju anemometra, segrevanje sesalnika med meritvijo in neenakomerna moč delovanja, negotovost meritve temperature okolja in merilna negotovost merilne verige pri merjenju hitrosti. Vzroki za neujemanje pri simulaciji so omejitve z računsko močjo, težave pri postavitvi robnih pogojev (uporabili smo izmerjene podatke) in poenostavitve detajlov geometrije izločevalnika in posode sesalnika. Zaradi omejitev z računsko močjo smo uporabili navedeno gostoto mreže in metodo »upwind« prvega reda natančnosti namesto metode »upwind« drugega reda natančnosti.

5 Zaključek

V nalogi smo optimirali rotacijski izločevalnik vodnega sesalnika z numeričnimi simulacijami in meritvami. Novi izločevalnik se odlikuje z najboljšim izkoristkom med vsemi konkurenti na trgu ter stopnjo izločanja, primerljivo z najboljšimi izdelki na trgu. Vstopna hitrost zračnega toka v izločevalnik po višini izločevalnika je v delovni točki skoraj konstantna, kar potrjuje, da je dizajn lopatic po višini izločevalnika dobro optimiran. Kljub kompleksnosti toko-



Slika 11. Vstopna hitrost zračnega toka v izločevalnik v različnih delovnih točkah

pri čemer ima največja dosežena hitrost v kateri koli delovni ali merilni točki vrednost 1.

skega pretoka, kar razbremeni sesalno enoto z izločevalnikom. Zrak pri visoki vrtilni frekvenci zaradi oblike

vnih struktur je ujemanje rezultatov meritve in analize CFD zadovoljivo in omogoča zanesljivo analizo rezultatov. Prednost izločevalnika je tudi enostavna izdelava iz enega kosa z orodjem s klasičnimi kokilami ter izboljšana mehanska trdnost ulitka. Vse bistvene izboljšave izločevalnika v primerjavi s konkurenčnimi rešitvami so patentirane [13].

Projekt izdelave rotacijskega izločevalnika je za zdaj v fazi, ko je izdelano prototipno orodje za izločevalnik, sesalne enote z izločevalnikom pa so v fazi testiranja življenjske dobe. Nadaljnje delo bodo narekovali kupci, proizvajalci sesalnikov. V prihodnosti bo zato potrebno opraviti natančne meritve izločanja prašnih delcev ter na podlagi teh meritev in pripomb kupcev po potrebi dodatno izboljšati izločevalnik.

Viri

[1] Hočevar M., Širok B., Eberlinc M.: Meritve aerodinamskih

lastnosti izločevalnika kapljic, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 2006.

[2] Pfajfar J.: Merilna postaja sesalnih enot, Diplomski naloga, Ljubljana 2002.

[3] Rihtaršič J.: Princip delovanja separatorja; Domel, Železniki, 2006.

[4] Blagojevič B., B. Širok, M. Hočevar: Cooling of the fibres in mineral wool produced by a double disc spinning machine, 2006.

[5] Hlebanja J.: Metodika konstruiranja, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 2003.

[6] Standard IEC 60312:1998+A1:2000+A2:2004, Vacuum cleaners for household use – Methods of measuring performance, 2005.

[7] McComb W. D.: The Physics of Fluid Turbulence, Oxford University Press, Oxford, 1996.

[8] Hinze J. O.: Turbulence: an introduction to its mechanism

and theory, Mc Graw-Hill, New York, 1959.

[9] Bohl W.: Strömungsmaschinen 2, Berechnung und Konstruktion, Vogel Buchverlag, 1995.

[10] Benedik G.: Kinematika kapljicastega toka v separatorju vodnih sesalnikov, Diplomski naloga, Ljubljana, 2007.

[11] Fluent Inc., Fluent 6.1, User's Guide, Lebanon 2003.

[12] Fluent Inc., Gambit 2.3 Documentation, Lebanon 2006.

[13] P 2007 0 0143: Patent - Separator sesalnika za prah, DOMEL d.d., Ljubljana 2007.

[14] EP 1261269B1: Patent - Separator for vacuum cleaner, HYLE d.o.o., Ljubljana 2001.

[15] US 6391101B2: Patent: - Separator with multiple function venes for a vacuum cleaner apparatus, Rexair US, 2001.

[16] EP 0890335A1: Patent: - Separator unit for liquid bath vacuum cleaners, Vetrella S.p.a., IT, 1997.

Optimization of rotating separator for wet vacuum cleaners

Abstract: Rotating separators in wet vacuum cleaners separate air from water droplets and dust particles. In the paper we present optimization of the separator for achievement of better efficiency and better separation of air from water droplets and dust particles. The optimization was based on CFD numeric simulations, aerodynamic measurements of integral and local characteristics of the suction unit with the separator, and on measurements of degree of separation. Measurements of the new separator have shown the best aerodynamic characteristics and comparable degree of separation among the best separators on the market.

Keywords: rotating separator, wet vacuum cleaner, degree of separation, aerodynamic efficiency, optimization,



Frekvenčni regulator Commander SK

- Za moči od 0,25 kW do 132 kW
- Vgrajen filter
- Možnost prigradnje internega PLK (Logic Stick)
- Smart Stick za kloniranje parametrov
- Vgrajen PID regulator
- Na zalogi
- Ugodna cena



Kalce 38b, 1370 Logatec
Tel: 01/750-85-10 E-mail: ps-log@ps-log.si
Fax: 01/750-85-29 www.ps-log.si

Izvajamo:

- konstrukcije in izvedbe specialnih strojev
- predelava strojev
- regulacija vrtenja motorjev
- krmiljenje strojev

Dobavljamo:

- servo pogone
- frekvenčne in vektorske regulatorje
- merilne sisteme s prikazovalniki
- pozicijske krmilnike
- planetne reduktorje



Prikazovalnik pozicije Z-58

- Univerzalni pozicijski prikazovalnik za inkrementalne in absolutne merilne sisteme
- 5 dekadni LED prikazovalnik, višina 14 mm
- Vmesnik RS232 in RS422
- Dva relejni izhoda
- Analogni vhod in izhod 0-10V ali 0-24mA