

# Izstopno hitrostno polje in tlačne razlike pri toku fluida skozi disk iz poroznega materiala

Gašper BENEDIK, Brane ŠIROK, Matjaž EBERLINC,  
Primož URBANČIČ, Aljoša MOČNIK

**Izvleček:** Članek obravnava radialni tok fluida skozi disk iz poroznega materiala z odprtocelično strukturo. Analizirane so tlačne razlike, ki nastanejo pri volumskem pretoku zraka skozi disk iz poroznega materiala, in izmerjena odvisnost tlačne razlike od volumskega pretoka zraka, velikosti celic materiala in dimenzij diska. Izmerjeno je hitrostno polje v neposredni bližini izstopne koaksialne površine diska z enokomponentnim anemometrom na vročo žičko. Obravnavano je hitrostno polje v odvisnosti od lokalne strukture materiala, volumskega pretoka zraka in dimenzij diska. Raziskava je namenjena razvoju brezlopaticnega turbinskega stroja, pri katerem je del pretočnega trakta rotorja turbinskega stroja izdelan iz poroznega materiala.

**Ključne besede:** porozen odprtocelični material, kovinska pena, disk, anemometer, tlačna razlika, hitrostno polje

## 1 Uvod

Odprtocelične kovinske pene se v zadnjem času uporabljajo v številnih aplikacijah, kot so toplotni izmenjevalci, ločevalniki vodnih kapljic, umirjevalci zračnega toka, zvočni izolatorji, filtri trdnih delcev itd. [1]. Vzrok za rast uporabe je v ustreznih izdelovalnih tehnologijah, s katerimi je mogoče izdelati cenovno zanimive in mehansko trdne porozne materiale z odprtocelično strukturo. Tipična odprtocelična porozna struktura je prikazana na *sliki 1*, kjer je razvidno, da celico materiala tvorijo pore in

trdna aluminijasta struktura okoli por, ki jo sestavljajo ligamenti trdnine, katerih stene so prehodne in omogočajo pretok. Poroznost odprtocelične strukture  $\varepsilon$  je na integralnem nivoju podana z izrazom:

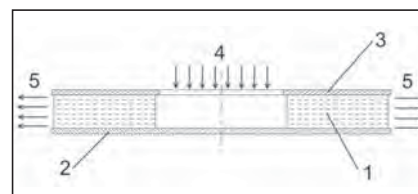
$$\varepsilon = \frac{V_{\text{prazen}}}{V_{\text{celoten}}} = \frac{1 - V_{\text{trdnine}}}{V_{\text{celoten}}} \quad (1)$$

kjer je  $V_{\text{trdnine}}$  prostornina trdne strukture,  $V_{\text{celoten}}$  pa celotna prostornina. Poroznost  $\varepsilon$  vpliva tako na integralne kot tudi na lokalne tokovne razmere v odprtocelični strukturi.

Članek obravnava radialni tok fluida skozi disk iz poroznega materiala z odprtocelično strukturo. *Slika 2* prikazuje obravnavani disk iz poroznega materiala. Porozni material 1 je vstavljen med spodnjo 2 in zgornjo stranico 3 iz neporozne aluminijaste zlitine, tako da je vstopni aksialni tok zraka 4 v disku preusmerjen v radialni tok 5 na izstopu iz diska.

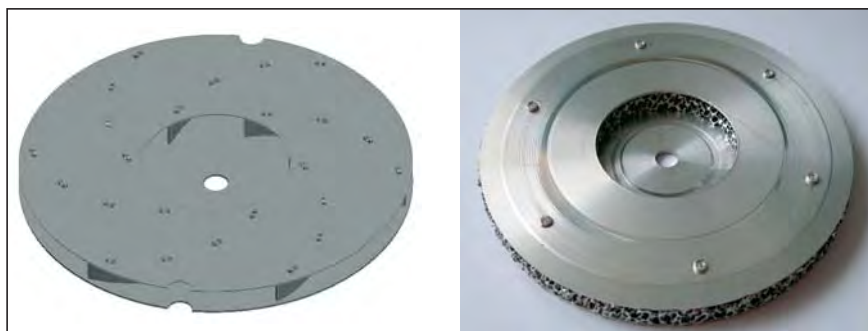


**Slika 1.** Fotografija aluminijastega odprtoceličnega poroznega materiala z 88-odstotno poroznostjo proizvajalca ERG materials



**Slika 2.** Shematski prikaz obravnavanega diska iz poroznega materiala: (1) porozni material, (2) spodnja stranica, (3) zgornja stranica, (4) vstopni aksialni tok, (5) izstopni radialni tok

Gašper Benedik, univ. dipl. inž., Domel d. d., Železniki, prof. dr. Brane Širok, univ. dipl. inž., Matjaž Eberlinc, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Primož Urbančič, univ. dipl. inž., Aljoša Močnik, univ. dipl. inž., Domel d. d., Železniki



Slika 3. Rotor običajnega turbopuhala na levi ter brezlopaticnega rotorja iz poroznega materiala na desni

Prispevek predstavlja del raziskav pri razvoju radialnega rotorja turbopuhala s poroznim pretočnim traktom rotorja, ki je opisan v patentni prijavi P-200800232 [2]. Prenos snovi in povečanje tlaka potekata preko strukture poroznega materiala in ne preko rotirajoče lopaticne kaskade rotorja turbopuhala. Oba tipa rotorja turbopuhala sta prikazana na sliki 3. Prirastek tlaka je predvsem posledica centrifugalnih sil, ki delujejo na fluid pri prehodu skozi rotirajočo porozno strukturo. Zaradi odsotnosti lopaticne kaskade se je možno izogniti slabostim klasičnih rotorjev, kot so vrtnčenje, odlepljanje toka, povratni tok ter tlačni sunki. Izkoristek dobljenega turbokolesa po pričakovanjih dosega podobne vrednosti v širšem območju pretokov, saj ni lopatic z geometrijo, optimizirano za nominalni obratovalni režim [3]. Tokovnice se v opisanem rotorju spreminjajo v odvisnosti od obratovalnega režima, njegova slabost je tlačna izguba v porozni strukturi in s tem padec aerodinamskega izkoristka. Zaradi povečevanja tlačnih izgub s povečevanjem relativnih hitrosti zračnega toka oziroma volumskega pretoka je rotor primeren za obratovanje v območju nižjih volumskih pretokov.

V prispevku se omejimo na študijo vpliva celične porozne strukture na radialni tok zraka skozi mirujoči porozni disk. Analizirana sta zgolj radialni tok skozi perforirano strukturo diska in tlačna razlika med zrakom na vstopu in izstopu iz diska. Raziskane so lastnosti turbulentnega toka v izstopni ravnini neposredno za odprtocelično celularno porozno strukturo.

## 2 Teoretične osnove toka fluida skozi porozen material

Sledi analitični popis toka fluida skozi porozno odprtocelično trdno strukturo pri velikih hitrostih [4–7]. Pretok fluida pri velikih hitrostih popišemo z nadgrajenimi Darcyjevimi enačbami, imenovanimi tudi Forchheimerjeve enačbe, ki jih je možno izpeljati iz Navier-Stokesovih enačb [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{K} \mathbf{v} + a \cdot |\mathbf{v}| \cdot \mathbf{v} + b \cdot |\mathbf{v}|^2 \mathbf{v} &= \\ = -\nabla p + \mathbf{f} + \lambda \Delta \mathbf{v} & \\ \nabla \mathbf{v} = 0 & \end{aligned} \quad (2)$$

V enačbi 2 predstavlja vektor  $\mathbf{v}$  hitrost,  $p$  tlak,  $\mathbf{f}$  sile (gravitacija, elektromagnetne sile, centrifugalna sila, Coriolisova sila),  $\mu$  dinamično viskoznost, matrika  $K$  prepustnost, matrika  $a$  predstavlja upor,  $b$  imenujemo Forchheimerjev koeficient in je običajno blizu 0, njegov vpliv je možno razbrati eksperimentalno. Če je poroznost materiala  $\varepsilon$  blizu 1 in zahtevana natančnost velika, je smiselna uporaba efektivne viskoznosti  $\lambda$  oziroma Brinkmanovega koeficienta. Za uporabo predstavljene teorije na primeru toka skozi disk lahko efektivno viskoznost  $\lambda$  in Forchheimerjev koeficient  $b$  zanemarimo, kot so naredili avtorji člankov [4–7], ki so raziskovali tok fluida skozi odprtocelične kovinske pene podobne poroznosti. Prav tako v našem delu niso prisotne zunanje sile na fluid  $\mathbf{f}$ . Dobljene poenostavljene enačbe imenujemo Darcy-Forchheimerjev sistem enačb:

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{K} \mathbf{v} + a \cdot |\mathbf{v}| \cdot \mathbf{v} &= -\nabla p \\ \nabla \mathbf{v} = 0 & \end{aligned} \quad (3)$$

Če obravnavamo tokovno polje v homogeni porozni snovi kot enodimenzionalni primer, lahko zapišemo enačbo 3 s koeficientom prepustnosti  $K$ , koeficientom upora  $C$ , dinamično viskoznostjo  $\mu$ , hitrostjo  $v$ , tlačno razliko  $\Delta p$  in dolžino poroznega materiala  $L$ :

$$\frac{\mu}{K} v + \rho \cdot C \cdot v^2 = \frac{\Delta p}{L} \quad (4)$$

Enačba 4 je običajno uporabljena pri oceni tlačne razlike  $\Delta p$  pri pretoku skozi porozno snov dolžine  $L$ . Prepustnost  $K$  in koeficient upora  $C$ , ki je dominanten pri večjih hitrostih fluida, lahko določimo eksperimentalno. Pri obravnavanju koaksialnega toka skozi porozni disk se hitrost  $v$  pri pretoku zaradi povečevanja pretočnega preseka spreminja v odvisnosti od polmera diska  $r$ . Enačbo 5, kjer je hitrost  $v(r)$  izražena z volumskim pretokom  $Q$ , lahko za primer pretoka skozi homogeni disk notranjega premera  $R_1$  in zunanjega premera  $R_2$  in višine  $h$  zapišemo v diferencialni obliki za diferencialni segment diska:

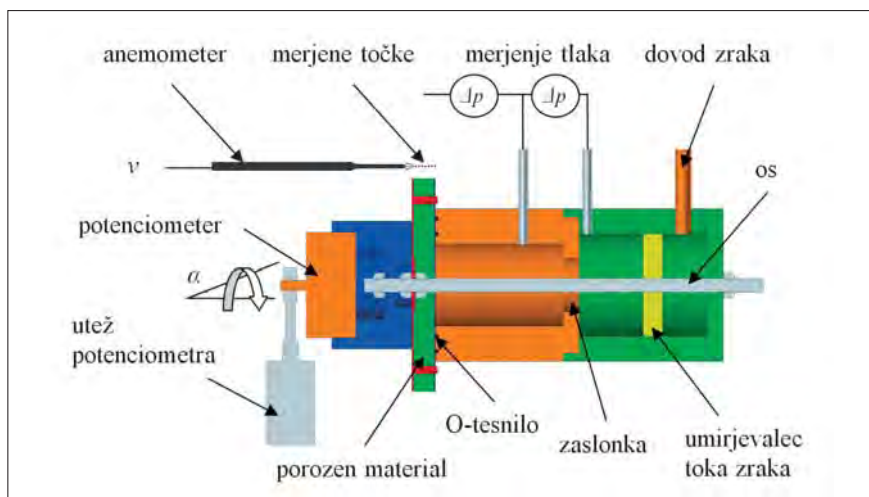
$$\begin{aligned} \frac{dp}{dr} &= \frac{\mu}{K} \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h} + \\ + \rho \cdot C \cdot \frac{Q^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot h^2} & \end{aligned} \quad (5)$$

in integralni obliki za celoten disk:

$$\begin{aligned} \Delta p(R_1, R_2) &= \int_{R_1}^{R_2} \left( \frac{\mu}{K} \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h} + \right. \\ \left. + \rho \cdot C \cdot \frac{Q^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot h^2} \right) dr & \end{aligned} \quad (6)$$

## 3 Opis eksperimenta

Predpriprava eksperimenta je obsegala izdelavo modelnih izvedb diskov, merilne naprave, postavitve merilne verige, umerjanje merilne naprave in anemometra na vročo žičko. Izvedba je vključevala meritve tlačnih razlik v odvisnosti od hitrosti zračnega toka skozi različne porozne materiale, različne dimenzije diskov in meritve lokalnih hitrosti na izstopu iz diska z anemometrom na vročo žičko. Vse meritve so bile izvedene v Laborato-



Slika 4. Shema merilne naprave

riju za vodne in turbinske stroje na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani.

Merilna naprava, prikazana na *sliki 4*, je sestavljena iz dovoda komprimiranega zraka, zaslonke nestandardne oblike, dveh merilnikov tlaka, diska iz poroznega materiala ter potenciometra z nastavkom, vgrajenim na prosto se vrtečo os, na kateri je pritrjen disk iz poroznega materiala. Elementi so toga povezani z osjo in maticami. Eden od položajev anemometra med meritvijo je prikazan na *sliki 4*. Hitrosti po obodu diska merimo pri počasni rotaciji diska pri vrtilni frekvenci  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , medtem ko je anemometer fiksen. Odkloni smeri radialne in tangencialne hitrosti zaradi rotacije diska so računsko korigirani. Kot zasuka med anemometrom in diskom merimo s potenciometrom, vrednosti tlakov odčitamo z zaslonke tlačnih senzorjev. Tesnjenje med stranico diska in merilno pripravo je izvedeno z dvema O-tesniloma, ostali spoji so bili zatesnjeni s silikonskim kitom.

### 3.1 Izračun pretoka zraka

Pretok zraka smo izračunali na podlagi tlačne razlike na zaslonki nestandardne oblike. Pred pričetkom meritev je bilo potrebno umeriti koeficient nestandardne zaslonke  $k_2$ . Za umerjanje smo namesto poroznega diska na merilno napravo namestili ostrorobo zaslonko standardne oblike [8], premera 20 mm, s koeficientom zaslonke  $k_1$ , skozi katero smo izmerili

volumski pretok. Izračun je bil izveden v skladu s standardom ISO 5167 [8] po naslednji enačbi:

$$Q = k_1 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{z1}}{\rho_z}} \quad (7)$$

pri čemer je  $\Delta p_{z1}$  korigirana tlačna razlika na zaslonki in  $\rho_z$  gostota zraka, določena glede na zračni tlak, temperaturo in vlažnost. Ker je zaradi konstrukcije merilne naprave volumski pretok skozi standardno zaslonko enak volumskemu pretoku skozi zaslonko nestandardne oblike, lahko izračunamo koeficient zaslonke nestandardne oblike s premerom 30 mm  $k_2$  z vgrajeno osjo v sredini po enačbi 5. Odvisnost koeficienta

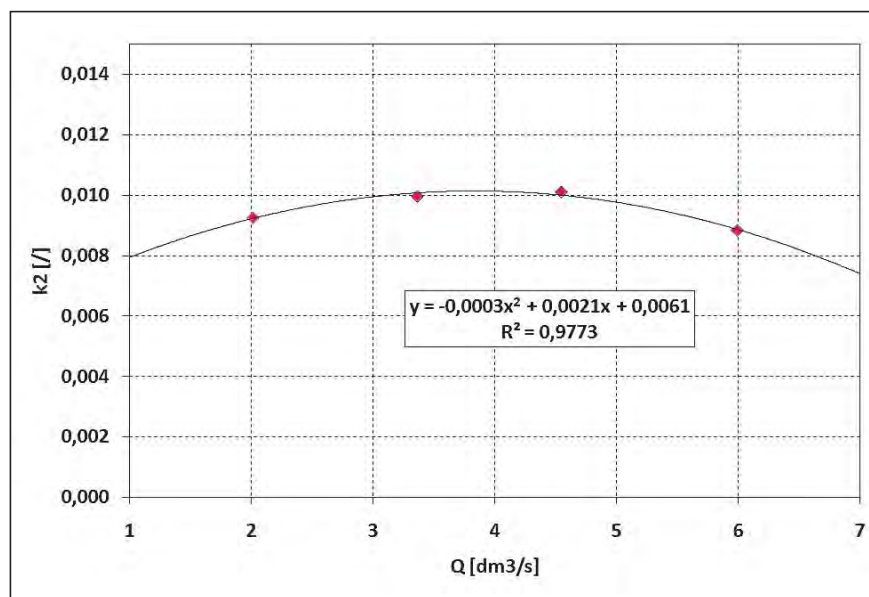
$k_2$  od volumskega pretoka  $Q$  je eksperimentalno določena za območje, v katerem izvajamo meritve, in prikazana na *sliki 5*.

### 3.2 Lokalne meritve hitrostnega polja

Na osnovi predhodnih meritev z dvokomponentnim anemometrom na vročo žičko, ki so pokazale, da je radialna komponenta hitrosti v izstopni koaksialni ravnini diska dominantna, je izbran enokomponentni anemometer. Lokalne meritve hitrostnega polja so izvedene z umerjenim anemometrom na vročo žičko Dantec Mini CTA z enokomponentnim zaznavalom Dantec 55P11. Žička senzorja je debeline  $5 \mu\text{m}$  in dolžine  $1,25 \text{ mm}$ . Frekvenca zajemanja podatkov je  $5 \text{ kHz}$ , čas zajemanja podatkov znaša  $10 \text{ s}$ , pri čemer je opravljen zasuk disk za  $360^\circ$ . Temperatura žičke anemometra je nastavljena na  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Oddaljenost med anemometrom in poroznim materialom je  $3 \text{ mm}$ . Meritve in umerjanje so izvedeni v skladu s postopkom, ki ga opisujeta Bruun [9] in Jørgenson [10].

### 3.2 Merilna negotovost

Merilna negotovost merjenja tlačnih razlik se nanaša na merilno negotovost meritve razlike tlakov s tlačnimi zaznavali, meritve temperature, pogojev okolice (temperature, relativne



Slika 5. Izmerjeni koeficienti  $k_2$  zaslonke nestandardne oblike v odvisnosti od volumskega pretoka  $Q$

vlačnosti in barometerskega tlaka) ter napake pri umerjanju zaslonke. Skupna merilna negotovost meritev tlačnih razlik  $\Delta p$  v odvisnosti od pretoka  $Q$  je ocenjena s 3,0 % od dejanske vrednosti. Merilna negotovost meritve hitrostnega polja je odvisna od negotovosti: umerjanja anemometra, merjenja temperature, ki vpliva na točnost umerjanja anemometra, popravka napetosti zaradi spreminjanja temperature od meritve, pogreška aproksimacije, meritve pogojev okolice, končnega časa meritve, nastavljanja lege anemometra in pozicionirnega sistema (pozicionirna miza, potenciometer) ter nastavitve delovne točke. Skupna merilna negotovost meritev hitrostnega polja na izstopu iz poroznega diska pa je ocenjena z 2,8 % od dejanske vrednosti [11]. Glede na to, da se postopki merjenja niso spreminjali, lahko prevzamemo, da so vse meritve v mejah, ki so navedene, in se merilna negotovost na posameznih merilnih zaznavalih ni spreminjala.

#### ■ 4 Rezultati meritev tlačnih razlik na poroznem disku

V poglavju so prikazane meritve tlačnih razlik v odvisnosti od volumskega pretoka štirih diskov iz poroznega materiala. Razlikujejo se v velikosti celic materiala (PPI – uveljavljena oznaka za število por materiala na palec dolžinske enote [7]), v višini turbokolesa  $h$  ter v notranjem premeru diska  $d_{not}$  medtem ko je zunanji premer diska  $d_{zun}$  vedno enak. Parametri diskov so podani v tabeli 1.

Slika 6 prikazuje rezultate meritev tlačnih razlik v odvisnosti od volumskega pretoka pri štirih različnih diskih. Prav tako lahko razberemo, da je tlačna razlika pri pretoku zraka skozi material z manjšo velikostjo celic (40 PPI,  $h = 8,5$  mm  $d_{not} = 47,5$  mm) malenkost večja kot pri pretoku skozi material z večjimi celicami (20 PPI  $h = 8,5$  mm  $d_{not} = 47,5$  mm). Glede na obstoječe raziskave smo pričakovali nekoliko večjo razliko [7]. Z zviševanjem višine diska z 8,5 mm na 12,5 mm zaradi zmanjšanja pretočne hitrosti znižamo tlačno razliko na polovico v skladu z enačbo 6.

**Tabela 1.** Parametri merjenih diskov

Št. diska	$d_{not}$ [mm]	$d_{zun}$ [mm]	$h$ [mm]	PPI	Pora [mm]
disk 1	47,5	125	8,5	40	0,625
disk 2	47,5	125	8,5	20	1,250
disk 3	47,5	125	12,5	40	0,625
disk 4	67,5	125	12,5	40	0,625

Najnižja tlačna razlika je na disku višine 12,5 mm z dodatno povečanim notranjim premerom s 47,6 mm na 67,6 mm. S povečavo notranjega premera se tlačna razlika zniža za polovico. Zaradi nižjih hitrosti zračnega toka v vstopnem ustju postane tok v večjem delu laminaren, kar je razvidno iz majhnega kvadratičnega koeficienta aproksimiranega polinoma [7].

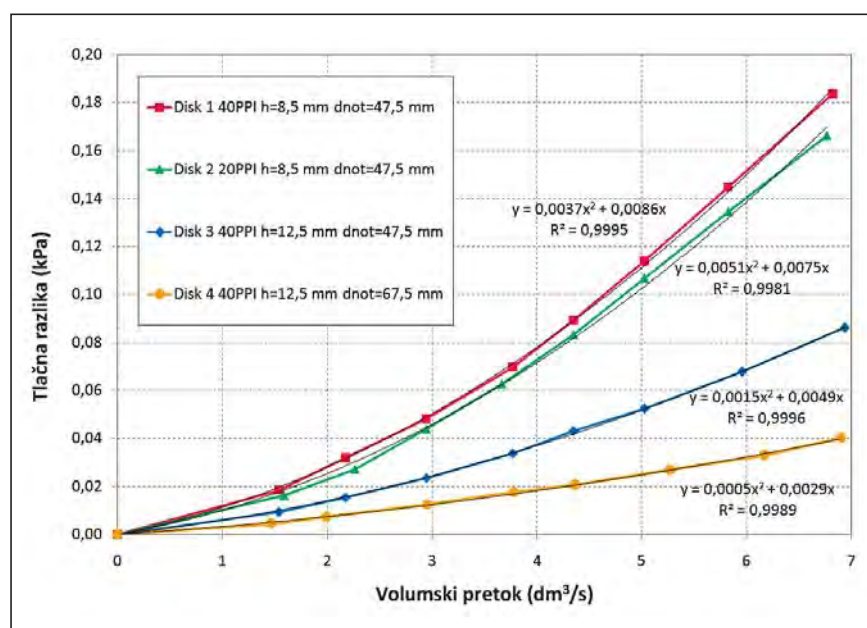
Vse meritve je mogoče dobro aproksimirati v skladu z enačbo 6 s polinomom drugega reda. Linearni člen prevladuje pri majhnih pretokih, ko je tok zraka laminaren, kvadratni člen pa pri turbulentnem toku. Dukhan je prišel do podobnih ugotovitev pri meritvah na podobnem materialu v obliki kvadra [7].

#### ■ 5 Rezultati meritev hitrostnega polja

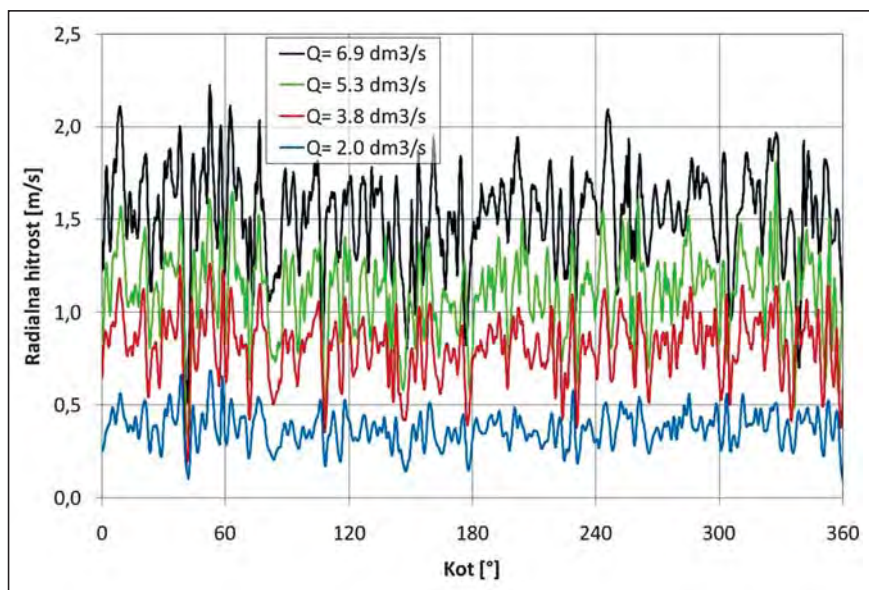
V tem delu so predstavljene meritve lokalnih hitrosti zračnega toka v oddaljenosti 3 mm od zunanjega oboda diska. Slika 7 predstavlja hitrostno porazdelitev izstopajočega zračnega

toka v odvisnosti od obodnega kota, ki določa relativni položaj zasuka diska glede na izhodiščni položaj, ter od volumskega pretoka zraka skozi disk. Potek krajevne porazdelitve hitrosti je bil dobljen iz časovnega hitrostnega signala in simultano zajete vrednosti kota zasuka. Pri poljubnem zasučnem kotu je bilo izvedeno časovno povprečenje signala v področju  $\pm 0,5^\circ$  zasučnega kota.

Fluktuacije izstopnih radialnih hitrosti lahko povežemo z obliko porozne odprtocelične strukture diska na izstopni površini diska (slika 7). Lokalna porazdelitev por in ligamentov trdne faze na izstopni površini ter notranje strukture kanalov blizu izstopne površine vplivajo na hitrostne anomalije, ki se odražajo v hitrostnih fluktuacijah. Iz potekov hitrosti je razviden fluktuirajoč stohastični značaj hitrostnega polja. Razvidno je tudi, da se s pretokom povprečna radialna hitrost povečuje, stopnja relativne vrednosti krajevne fluktuacije pa ohranja, kar navaja na homogen značaj turbulentnega polja na izsto-



**Slika 6.** Meritve tlačnih razlik v odvisnosti od volumskega pretoka različnih diskov



**Slika 7.** Časovno povprečne izstopne radialne hitrosti pri različnih volumnskih pretokih  $Q$  po celotnem obodu diska pri višini  $h = 6,25$  mm

pni ravnini diska. Iz diagramov na sliki 7 lahko tudi ocenimo, da mesta lokalnih minimumov in maksimumov hitrosti ostajajo na enakih mestih glede na višino in kot zasuka diska, kar je pričakovano, saj so hitrostne anomalije značilno povezane z lokalnimi lastnostmi porozne strukture. Slika 8 prikazuje povečevanje standardne deviacije radialne hitrosti s povečevanjem volumnskega pretoka  $Q$ . Pri tem pa se, kot je razvidno s slike 8, vrednost fluktuacij radialne hitrosti  $v_{rad}$

$$\chi = \frac{\sigma}{v_{rad}} \quad (8)$$

ki predstavlja lokalno stopnjo turbulence, nekoliko povečuje s povečevanjem radialne hitrosti. Iz tega sledi, da so fluktuacijske lastnosti hitrostnega polja na makroskali osnosimetrične oziroma homogene, kar velja tudi za geometrijske lastnosti odprtočelične porozne strukture.

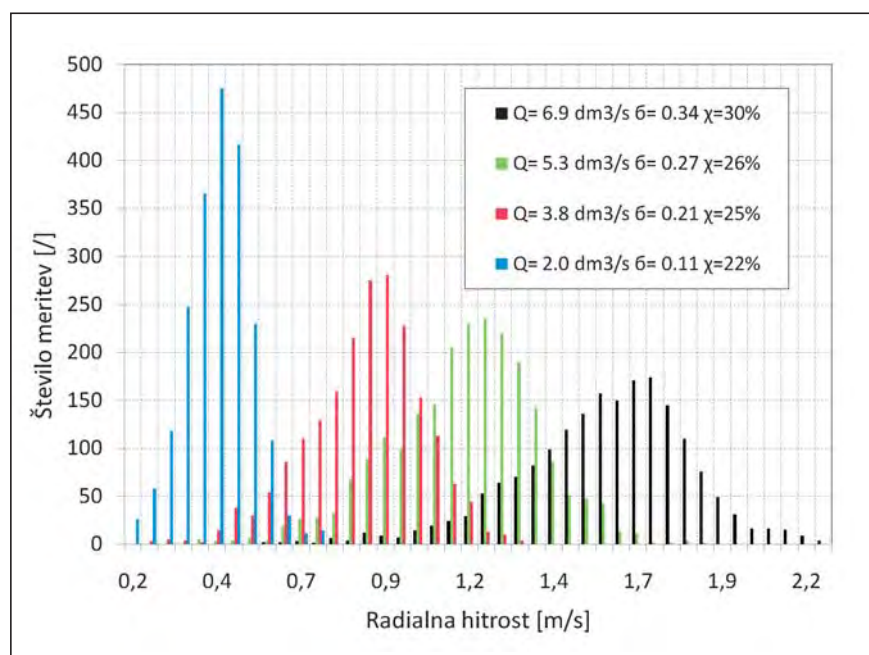
Slika 9 prikazuje radialne hitrosti na izstopu iz poroznega materiala. Razvidno je precejšnje ujemanje področij z višjimi hitrostmi in luknjicami v poroznem materialu. Hitrosti so v bližini stene diska zaradi mejne plasti ustrezno nižje. Odstopanja lahko pripišemo napaki meritve, vplivu strukture poroznega materiala pod površino, ki ni razvidna iz foto-

grafije poroznega materiala, vendar ima tudi vpliv na izstopno hitrostno polje. Prav tako povzroči neujemanje usmerjenost izstopnega curka zraka skozi vsako poro, ki ni popolnoma pravokotna na površino, temveč odvisno od lokalne strukture celičnega materiala. Zaradi meritve na oddaljenosti 3 mm posledično pride do zamika maksimalne hitrosti glede na položaj pore. Izmerjene hitrosti so pričakovano najnižje tik ob zgornji in spodnji steni rotorja (višina  $h = 0$  mm in 12,5 mm).

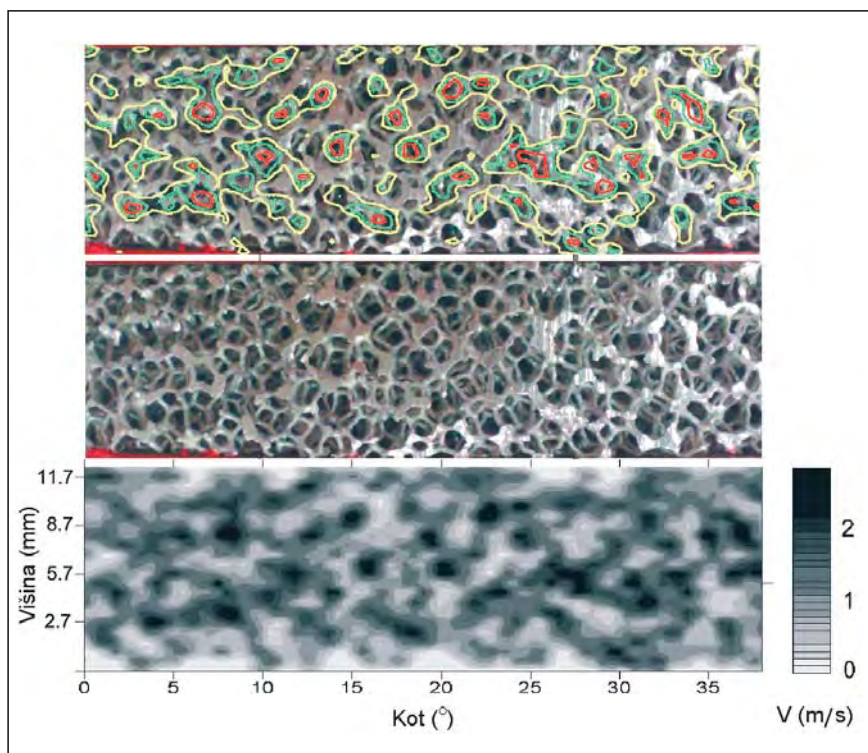
## 6 Zaključek

V članku so bile podane osnove teoretičnega popisa pretoka fluida skozi disk iz odprtočeličnega poroznega materiala. Izdelana in umerjena je bila preizkusna naprava. Izveden je bil eksperiment meritve tlačnih razlik in izstopnega hitrostnega polja zračnega toka. Ugotovili smo, da s povečevanjem višine in vstopnega premera diska izrazito zmanjšamo tlačne razlike pri pretoku zraka skozi disk. Zmanjšanje tlačnih razlik dosežemo tudi z uporabo materiala z večjimi celicami, vendar je ta vpliv v primerjavi s povečanjem višine manj značilen.

Pri analizi hitrostnega polja smo ugotovili pričakovano povezavo med meritvami večjih radialnih hitrosti in porami na površini poroznega materiala. Standardna deviacija radialnih hitrosti se s povečevanjem volumnskega pretoka povečuje. Mesta lokalnih maksimumov in minimumov hitrosti se s povečevanjem volumnskega pretoka ne spreminjajo značilno. Za opazovani odprtočelični porozni material lahko zaključimo, da so fluktuacijske lastnosti hitrostnega polja v izstopni ravnini diska homogene na makroskali. Stopnja turbulence radialne hitrosti je osno simetrična



**Slika 8.** Histogram radialnih hitrosti pri različnih volumnskih pretokih s podanimi krajevnimi standardnimi deviacijami in krajevnimi stopnjami turbulence



**Slika 9.** Grafični prikaz izmerjenih absolutnih hitrosti je prikazan s sivinami na spodnji sliki. V sredini se nahaja posnetek merjenega mesta poroznega materiala. Zgornja slika prikazuje konture višjih hitrosti zračnega toka in posnetek poroznega materiala v ozadju (rumena predstavlja 1,2 m/s, zelena 1,7 m/s in rdeča kontura 2,2 m/s).

na makroskali in se povečuje s povečevanjem volumskega pretoka. Prav tako lahko zaključimo, da ni koherentnih tokovnih struktur, ki bi lahko v primeru uvajanja tehnične rešitve v turbinskih strojih generirale značilne akustične efekte.

Dobljeni rezultati so uporabni za raziskave na novem brezlopatičnem tipu turbostroja iz poroznega materiala, pri katerem prenos energije iz rotorja na fluid poteka preko strukture poroznega materiala in ne preko lopatic rotorja kot pri običajnih turbostrojih.

## Literatura

- [1] Duocel® metal foam (www.ergaerospace.com).
- [2] Širok, B., Benedik, G., Močnik, A.: Rotor centrifugalnega turbostroja, patentna prijava, P-200800232, Ljubljana, 2008.
- [3] Benedik, G., Širok, B., Hočevnar, M.: Študija aerodinamskih karakteristik tubrbopuhal pri gorivnih celicah, Prvi podiplomski seminar, Ljubljana, 2008.
- [4] Vafai, K., Hadim, A., H.: Handbook of porous media, Chapter

9: Flow and thermal convection in rotating porous media, Marcel Dekker, New York, 2000.

- [5] Bear, J.: Dynamics of fluids in porous media, American Elsevier Publ., New York, 1972.
- [6] Du Plessis, J. P.: Fluid Transport in Porous Media – Advances in Fluid Mechanics, WIT Press, 1997.
- [7] Dukhan, N.: Correlations for the pressure drop for flow through metal foam, Exp fluids, Detroit, USA, 2006.
- [8] Standard EN ISO 5167-1: 1995, Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten, Fluid, Drosselgerät, Leitung, Kreisquerschnitt, 1995.
- [9] Bruun, H., H.: Hot-wire anemometry – Principles and signal analysis, Oxford university press, New York, 1995.
- [10] Jørgensen, F., E.: How to measure turbulence with hot-wire anemometers, A practical guide, Dantec Dynamics, 2005.
- [11] Eberlinc, M., Širok, B., Hočevnar, M.: Experimental investigation of the interaction of two flows on the axial fan hollow blades by flow visualization and hot-wire anemometry, Experimental thermal and fluid science, vol. 33, issue 5, 2009.



**DOMEL®**  
Ustvarjamo gibanje

## Exit velocity field and pressure differences for fluid flow through porous material

**Abstract:** Article treats radial fluid flow through stationary open cell porous material disc. Pressure differences for airflow through disc and airflow velocity field on exit from disc are analysed. Air flow pressure difference dependency versus air volume flow, cells size and disc dimensions is measured. Measurements of local air flow velocities close to coaxial disc exit surface were performed with one component hot wire anemometer. Air flow velocity field dependency from local material structure and volume flow was analysed. Research is connected with development of bladeless turbo machine, where is a part of turbo machine rotor flow tract made of porous material.

**Key words:** porous open cell material, metal foam, disc, anemometer, pressure difference, velocity field,