

# Numerična analiza krožnega cevnega loka kot merilnika prostorninskega pretoka

Mitja MORI, Ivan BAJSIĆ

**Izvleček:** V prispevku je obravnavana potencialna možnost uporabe krožnega cevnega loka (KCL) kot merilnika prostorninskega pretoka zraka. Predstavljeni so rezultati numerične analize 3D-turbulentnega toka viskozne, stisljive tekočine v KCL z ravnim natočnim in iztočnim delom pretočne cevi dolžine 28 D. Numerični model je bil oblikovan na podlagi obstoječe geometrije KCL in z upoštevanjem robnih pogojev, značilnih za merilno preizkuševališče, na katerem je bil predhodno izveden eksperimentalni del raziskav prototipnega modela merilnika. Analizirani so različni pretočni robni pogoji. Določeni sta največja razlika statičnih tlakov med notranjim in zunanjim obodom KCL in geometrijska lega skrajnih vrednosti statičnih tlakov za različne simulirane prostorninske pretoke zraka. Na podlagi rezultatov numeričnega modeliranja je ugotovljeno, da se s spreminjanjem prostorninskega pretoka zraka geometrijska lokacija skrajnih vrednosti statičnih tlakov na notranjem in zunanjem obodu KCL ne spreminja. Določena je tudi funkcijska odvisnost med izračunano največjo razliko statičnih tlakov in prostorninskim pretokom zraka, ki predstavlja izračunano pretočno konstanto merilnika pretoka. Nadalje je ugotovljena funkcijska odvisnost tudi v primeru konvencionalnega merjenja tlačne razlike pod kotom odjema tlaka 45° v KCL. Prikazane so tlačne in hitrostne razmere v računskem območju s stališča tlačnih izgub in generiranih vrtničnih tokov na iztočnem delu KCL.

**Ključne besede:** krožni cevni lok, numerična analiza, prostorninski pretok, zrak, statični tlak

## 1 Uvod

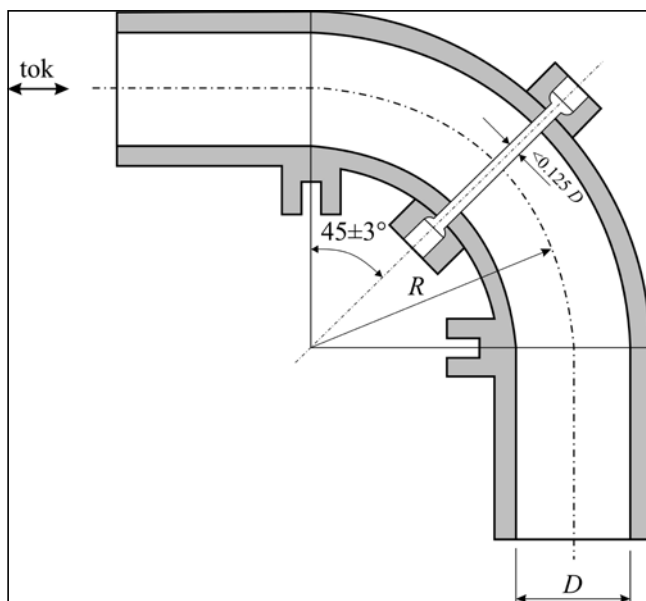
Merjenje prostorninskih pretokov je zelo pomembno za trgovanje s tekočinami kot tudi za kakovost delovanja energetskih in drugih procesov v industriji. Poznavanje lastnosti merilnikov prostorninskega pretoka in tokovnih razmer v njih je zato temeljnega pomena. V industrijski in laboratorijski praksi so najpogosteje uporabljeni merilniki prostorninskega pretoka, ki delujejo na podlagi poznavanja tlačne razlike in povzročajo

določene stalne tlačne padce vzdolž cevovoda ter popačenje tokovnih razmer (ostroroba merilna zaslonka, venturijeva merilna cev, merilne šobe itd.) [1]. KCL v nasprotju z večino merilnikov prostorninskega pretoka povzroča zelo majhno tokovno-pretočno motnjo v cevnem sistemu [2]. Merilnik, je sestavljen iz primarnega in sekundarnega dela (slika 1). Primarni del merilnika je 90-stopinjski krožni cevni lok, kjer se kot posledica toka tekočine pojavi razlika povprečnega statičnega tlaka med zunanjim in notranjim obodom KCL. Sekundarni del merilnika je merilnik razlike statičnega tlaka. Ker je razlika statičnega tlaka med notranjim in zunanjim obodom KCL relativno majhna, mora imeti merilnik razlike statičnega tlaka ustrezno občutljivost

oziroma ločljivost in natančnost. Odjemi statičnega tlaka so v večini primerov nameščeni pod kotom 45° (slika 1) [3].

V literaturi je uporaba krožnega cevnega loka že razmeroma dobro raziskana, tako eksperimentalno kot tudi numerično. Prva ideja o uporabi KCL kot merilnika pretoka sega že v začetek dvajsetega stoletja [4]. Poleg velikega števila eksperimentalnih študij, v katerih je raziskan vpliv različnih parametrov na pretočni koeficient ([2], [5]–[7]), so v novejšem obdobju dodatno prisotne študije na podlagi numeričnih izračunov in modelov ([7]–[9]). Numerični modeli nam kot dodatek k eksperimentalno dobljenim podatkom omogočajo bolj poglobljeno študijo tokovnih

Dr. Mitja Mori, univ. dipl. inž.,  
izr. prof. dr. Ivan Bajsić, univ.  
dipl. inž., oba Univerza v Ljubljani,  
Fakulteta za strojništvo



Slika 1. Krožni cevni lok [2]

razmer znotraj KCL in raziskovanje fenomenov, ki jih s pomočjo eksperimentalnega pristopa ni mogoče preprosto zajeti.

V prispevku je podan teoretični fizikalni model krožnega cevne loka kot merilnika prostorninskega pretoka, na katerem temelji numerični model. Predstavljena je geometrija pretočne cevi, diskretizacija računskega območja in uporabljeni robni pogoji. V rezultatih je podana lokacija mejnih vrednosti statičnega tlaka na KCL, kjer bi bila najprimernejša lokacija tlačnih odjemov. Na podlagi razlike tlakov je postavljena odvisnost prostorninskega pretoka od največje razlike statičnih tlakov za obravnavani KCL. Predstavljeni so vpliv KCL na porazdelitev statičnega tlaka v natočni in iztočni pretočni cevi, padec statičnega tlaka vzdolž računskega območja in značilne hitrostne razmere v pretočni cevi KCL.

## 2 Fizikalna izhodišča

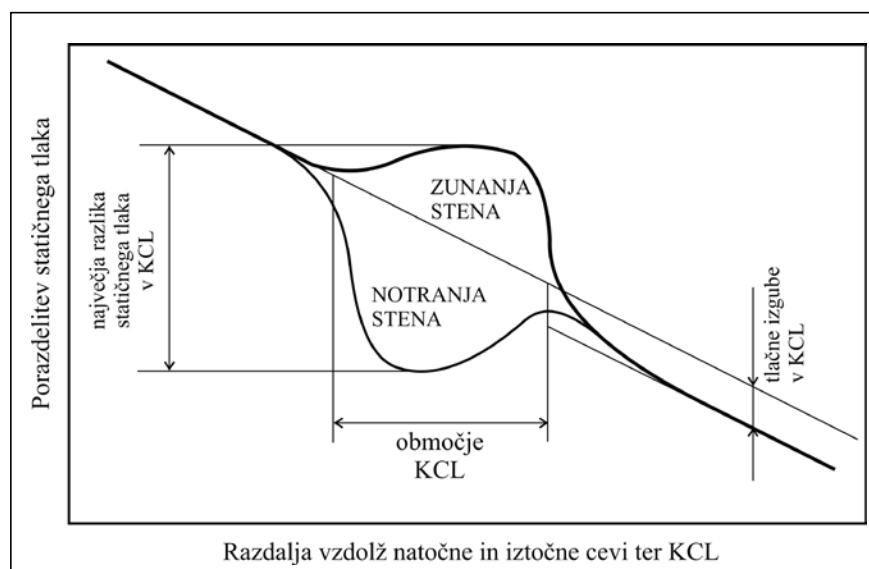
Na pretok tekočine skozi KCL vpliva kotni pospešek in zaradi delovanja centrifugalne sile se tlak na zunanji steni krožnega cevne loka povečuje, na notranji pa zmanjšuje. Tej spremembi sledi tudi tokovno polje, tako da se območje najvišje hitrosti pomakne najprej k notranji in nato k zunanji steni [4]. Zaradi delovanja centrifugalne sile se pojavi pozitivni tlačni gradient najprej na zunanji in

nato notranji steni, kar ima za posledico separacijo mejne plasti. V KCL je separacija bolj intenzivna na notranji steni [2]. Poleg tokovnega režima na obsežnost separacije vplivajo še velikost kota med vstopno in izstopno ravnino, radij ukrivljenosti in hrapavost stene ([2], [10]).

Posledica delovanja centrifugalne sile na mejno plast

so sekundarni tokovi, ki, kot bo pokazano tudi v numeričnih izračunih, oblikujejo vrtnično dvojico, naloženo na glavni tok. Ta vrtnična dvojica je zelo izrazita in je lahko prisotna še 50 do 75·D za krožnim lokom, kjer D predstavlja notranji premer cevovoda ([10] in [11]).

Na sliki 2 je prikazana tipična porazdelitev statičnega tlaka na zunanji in notranji steni pretočne cevi z dolgo ravno natočno in iztočno cevjo. Najmanjši statični tlak se praviloma pojavi nekoliko pred sredino KCL, največji pa nekoliko za sredino KCL. Tako lahko pričakujemo največjo razliko v statičnem tlaku z ustrezno zamaknjenima tlačnima odjemoma.



Slika 2. Značilna porazdelitev statičnega tlaka na zunanji in notranji steni

Prostorninski pretok  $q_v$  in razlika statičnih tlakov  $\Delta p$  sta v KCL v naslednjem razmerju:

$$q_v = K_{KCL} \sqrt{\Delta p} \quad (1)$$

kjer je:  $K_{KCL}$  pretočna konstanta merilnika pretoka in

$\Delta p$  razlika statičnih tlakov na zunanjem in notranjem obodu KCL.

Za natančnejši študij tokovnih in tlačnih razmer v KCL je bil oblikovan numerični model. Na podlagi rezultatov numeričnih izračunov je določeno mesto odjema statičnega tlaka, kjer vrednosti izračunanih statičnih tlakov na zunanjem in notranjem obodu KCL dosežeta svoj maksimum.

## 3 Numerično modeliranje

Numerični izračun je narejen s pomočjo programskega paketa TASCflow, ki temelji na metodi končnih volumnov [12]. Numerični pristop zahteva rešitev vodilnih tokovnih enačb. Natančnost metode je odvisna od numerične sheme, modeliranja turbulence, numeričnega modela in kakovosti računske mreže [12]. Osnova za izračun so tri splošne transportne enačbe [12]: kontinuitetna, gibalna in energijska, ki opisujejo tako tokovne kot toplotne razmere v računskem območju. Vse tri temeljne zakonitosti lahko matematično izrazimo z različnimi zapisi. V nadaljeva-

nju so prikazane transportne enačbe v oblikah, kakršne uporablja tudi program TASCflow [12].

Kontinuitetna enačba:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{w}) = 0 \quad (1)$$

Gibalna enačba:

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{w} \vec{w}) =$$

$$= \nabla \cdot (-p \delta + \mu (\nabla \vec{w} + (\nabla \vec{w})^T)) + S_M$$

Energijska enačba:

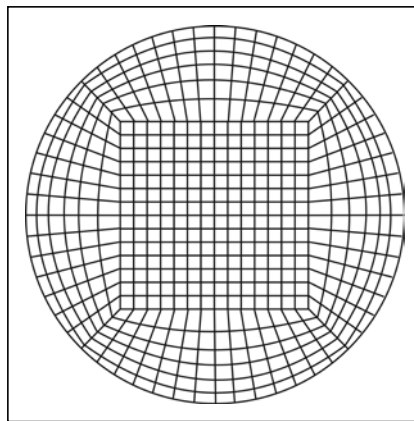
$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{w} h_{tot}) =$$

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E$$

Razmere v KCL so bile obravnavane kot stacionarni primer, zato lahko v enačbah (1), (2) in (3) opustimo vse člene s parcialnimi odvodi po času. Eden izmed problemov pri numeričnem modeliranju je izbira ustreznega modela turbulence. Za našo cevno geometrijo je bilo smiselno izbirati med modelom turbulence  $k-\epsilon$  in  $k-\omega$ . V izbranem cevovodu imamo opravka z zrakom relativno nizkih hitrosti, kar ima za posledico nizka Reynoldsova števila. Zato smo uporabili standardni model turbulence  $k-\omega$ , ki je formuliran za področje nizkih Reynoldsovih števil in je natančnejši ter stabilnejši s stališča numerične konvergence kot model  $k-\epsilon$ .

### 3.1 Numerični model

Numerični model sestavlja KCL premera  $D = 80$  mm in radija ukrivljenosti  $R = 1 \cdot D = 80$  mm, natočna pretočna cev dolžine  $28 \cdot D$  in iztočna pretočna cev dolžine  $28 \cdot D$ . Ravno natočno in iztočno pretočno cev smo dodali geometriji samega KCL, da bi se izognili vplivu robnih pogojev na vtoku in iztoku na rezultate hitrostnih in tlačnih polj v KCL [11]. Pri določanju geometrije smo upoštevali zahteve za naknadno eksperimentalno verifikacijo dobljenih rezultatov na posebnem, v ta namen zgrajenem merilnem preizkuševališču [2].



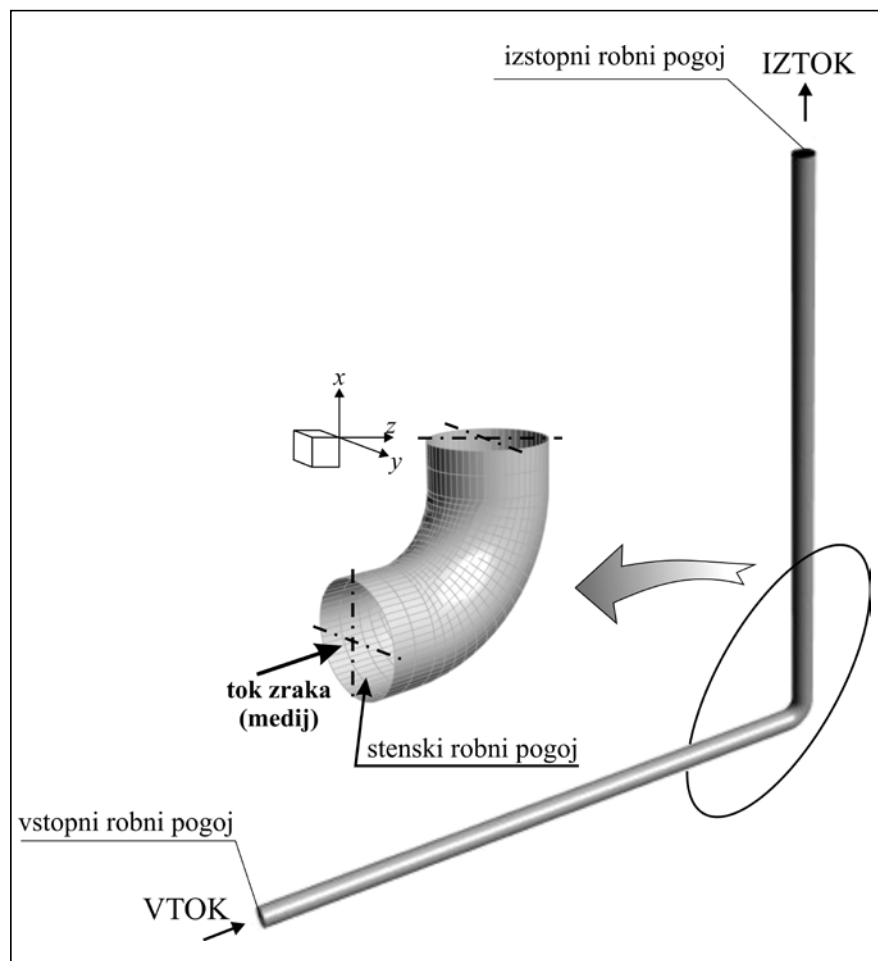
Slika 3. Diskretizacija geometrije pretočne cevi v prečni smeri

Računsko območje je bilo diskretizirano z ortogonalno mrežo (elementarni volumen je heksaeder). Ne glede na enostavno geometrijo KCL izbira topologije pri ortogonalni računski mreži bistveno vpliva na kakovost računске mreže. Uporabljena je bila računska mreža, prikazana na sliki 3.

Na sliki 4 je prikazana uporabljena diskretizacija (računska mreža) vzdolž pretočne cevi in v prečni ravnini. Topologija računskega območja je sestavljena iz računске mreže končnih prostornin s skupno 132.225 vozlišči. Za numerični izračun tlačnih razmer na plašču krožnega loka in tokovnih razmer v cevi je bil uporabljen komercialni programski paket TASCflow [12]. V tem primeru v sistemu tokovnih enačb upoštevamo tudi energijsko enačbo (3), zato dobimo kot rezultat numerične analize poleg hitrostnega in tlačnega polja tudi temperaturno polje.

### 3.2 Robni pogoji

Robni pogoji so bili postavljeni glede na tehnične značilnosti preizkuševališča za kasnejšo verifikacijo numerično dobljenih vrednosti [2]. Pretočna tekočina je zrak gostote  $\rho = 1,16$  kg/m<sup>3</sup> in temperature  $T = 20$  °C.



Slika 4. Prikaz geometrije računskega območja, smeri toka tekočine in uporabljene diskretizacije pretočne cevi v vzdolžni ter prečni smeri

**Preglednica 1.** Robni pogoji numeričnega modela, prikazanega na sliki 4

| Robni pogoj          | Predpis 1                           | Predpis 2                            | Predpis 3          |
|----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| vstopni robni pogoj  | raven hitrostni profil              | intenzivnost turbulence $T_u = 0,05$ | –                  |
| izstopni robni pogoj | statični tlak 98200 Pa              | –                                    | –                  |
| stena modela         | logaritski stenski zakon            | hidravlično gladka cev               | adiabatna stena    |
| medij                | zrak temperature $T = 20\text{ °C}$ | gostota $\rho = 1,16\text{ kg/m}^3$  | stisljiva tekočina |

**Preglednica 2.** Izbrani prostorninski pretoki zraka, pripadajoči masni pretoki, povprečne hitrosti zraka in Reynoldsova števila.

| Prostorninski pretok zraka $q_v\text{ m}^3/\text{h}$ | Masni pretok zraka $q_m\text{ kg/s}$ | Hitrost zraka v m/s | Re    |
|--|--------------------------------------|---------------------|-------|
| 16   | 0,005173                             | 1,03                | 5244  |
| 40   | 0,012933                             | 2,57                | 13110 |
| 65   | 0,021016                             | 4,18                | 21305 |
| 110  | 0,035567                             | 7,07                | 36055 |
| 160  | 0,051733                             | 10,292              | 52443 |

Od robnih pogojev smo spreminjali vstopno hitrost, ki smo jo dobili na podlagi geometrije pretočne cevi in prostorninskih pretokov (preglednica 2) zraka, določenih na merilnem preizkuševališču za eksperimentalno verifikacijo numeričnih rezultatov [2].

obodu KCL neodvisna od prostorninskega pretoka. To je bistvenega pomena za potencialno uporabo KCL kot merilnika prostorninskega pretoka.

Na sliki 5 je prikazana porazdelitev statičnega tlaka po zunanjem

obodu KCL, na sliki 6 pa porazdelitev statičnega tlaka po notranjem obodu KCL za največji prostorninski pretok. Pri preostalih prostorninskih pretokih (preglednica 2) so porazdelitve identične, spremeni se le absolutna vrednost statičnih tlakov. Lokaciji največjih in najmanjših statičnih tlakov na obodu KCL, ki sta prikazani na slikah 5 in 6, sta najprimernejši za namestitev tlačnih odjemov statičnega tlaka. Izračunane koordinate točk največjega statičnega tlaka na zunanjem obodu in najmanjšega statičnega tlaka na notranjem obodu KCL so podane v preglednici 3.

V večini primerov so priporočeni tlačni odjemi na sredini KCL pod kotom  $45^\circ$  (slika 1, [3]), vendar smo

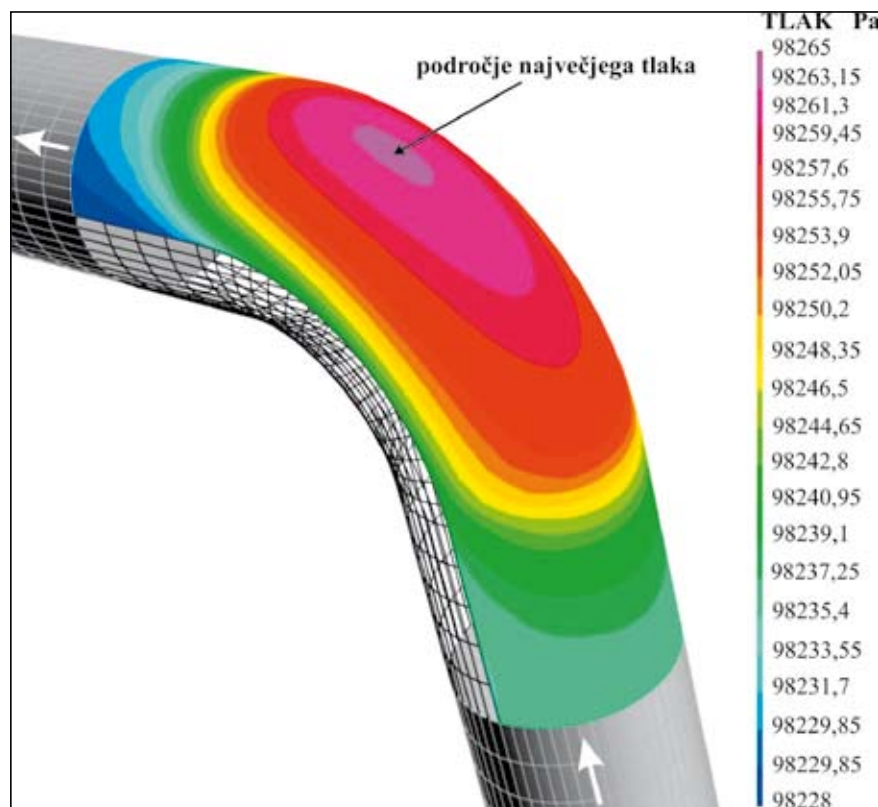
## 4 Rezultati

### 4.1 Določitev mest največjega in najmanjšega statičnega tlaka na obodu krožnega cevnega loka

Poznavanje porazdelitve statičnega tlaka po obodu obravnavane pretočne cevi je osnova pri uporabi KCL kot merilnika prostorninskega pretoka. KCL ima vpliv na tlačne razmere tako v natočni kakor tudi v iztočni pretočni cevi [11].

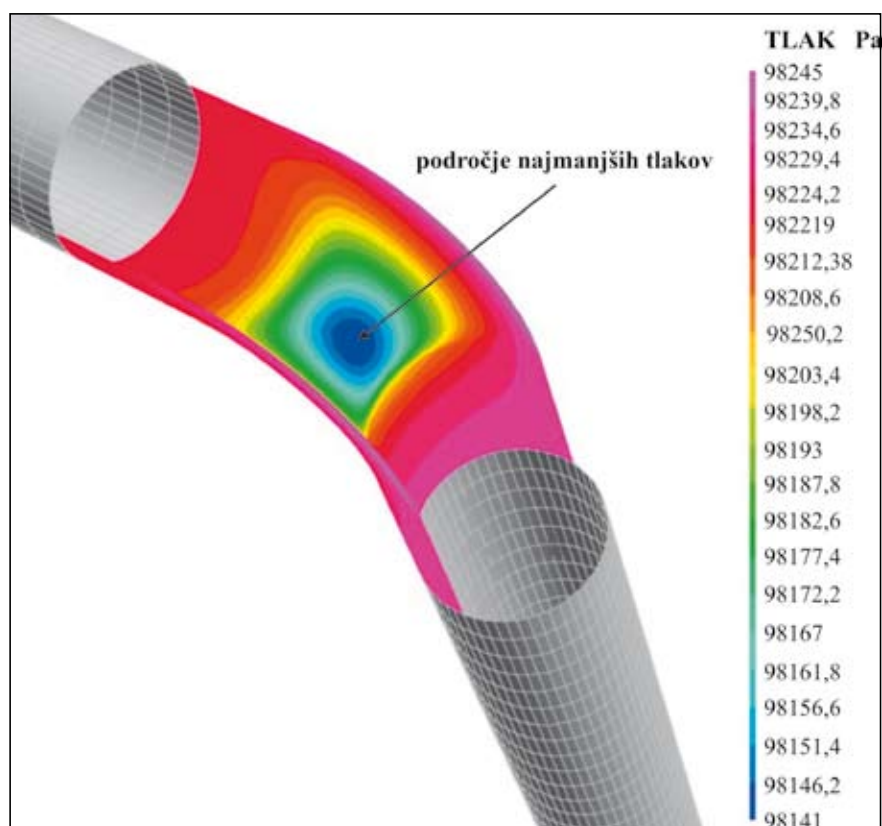
#### 4.1.1 Lokacija skrajnih vrednosti statičnega tlaka na obodu KCL

Z numeričnim postopkom smo prišli do porazdelitve statičnega tlaka po KCL pri vseh obravnavanih prostorninskih pretokih (preglednica 2). Pomembna ugotovitev, do katere smo prišli z analizo numerično dobljenih vrednosti za različne prostorninske pretoke, je, da je lokacija največjega in najmanjšega statičnega tlaka na



**Slika 5.** Področje največjih statičnih tlakov na zunanjem obodu KCL,  $q_v = 160\text{ m}^3/\text{h}$





Slika 6. Področje najmanjših statičnih tlakov na notranjem obodu KCL,  $q_v = 160 \text{ m}^3/\text{h}$

Preglednica 3. Izračunane koordinate največjega in najmanjšega statičnega tlaka na obodu KCL glede na koordinatni sistem na sliki 4

| Točka najmanjšega statičnega tlaka na notranjem obodu KCL |      |       | Točka največjega statičnega tlaka na zunanjem obodu KCL |      |        |
|---|------|-------|---|------|--------|
| x mm  | y mm | z mm  | x mm  | y mm | z mm   |
| -33,40  | 0    | 22,10 | -56,30  | 0    | 106,00 |

z numeričnim izračunom pokazali, da tako dobljena tlačna razlika ni največja. V preglednici 4 so izračunane vrednosti razlik statičnih tlakov za obravnavane prostorninske toke pri 45° odjemu statičnega tlaka in primerjane z največjimi izračunanimi.

Iz preglednice 4 je razvidno, da je razlika med tlačnimi razlikami absolutnih vrednosti majhna, vendar je v področju majhnih pretokov relativni merilni pogrešek večji (celo do cca. 5 % pri najmanjšem upoštevanem prostorninskem pretoku). Odvisnost izračunane razlike statičnih tlakov

Preglednica 4. Največja izračunana razlika statičnega tlaka v KCL in izračunana razlika statičnega tlaka pri 45° odjemu statičnega tlaka

| Največja razlika statičnega tlaka |                         | Razlika statičnega tlaka pri 45° odjemu |                         | Relativno odstopanje |
|-----------------------------------|-------------------------|---|-------------------------|----------------------|
| $q_v \text{ m}^3/\text{h}$        | $\Delta p_s \text{ Pa}$ | $q_v \text{ m}^3/\text{h}$              | $\Delta p_s \text{ Pa}$ | $e_r \%$             |
| 16                                | 1,195                   | 16                                      | 1,14                    | -4,6                 |
| 40                                | 7,578                   | 40                                      | 7,42                    | -2,09                |
| 65                                | 20,032                  | 65                                      | 19,71                   | -1,6                 |
| 110                               | 57,421                  | 110                                     | 56,72                   | -1,22                |
| 160                               | 121,671                 | 160                                     | 120,42                  | -1,03                |

od prostorninskega pretoka ustreza kvadratični paraboli (slika 7), kar se ujema z ugotovitvami drugih raziskovalcev ([1], [2], [13]). Ustrezna enačba odvisnosti tlačne razlike od prostorninskega pretoka v našem primeru je:

$$\Delta p = 0,0048 \cdot q_v^2 - 0,0017 \cdot q_v + 0,008 \quad (4)$$

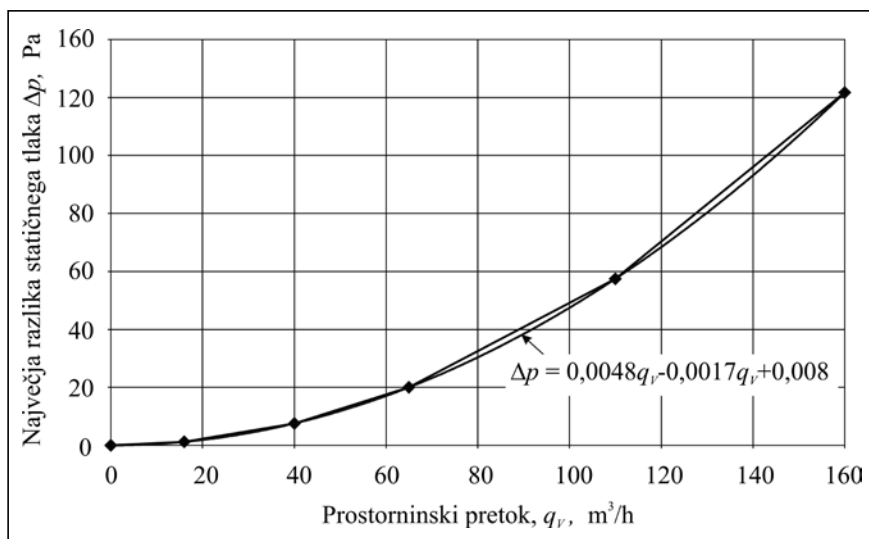
Na podlagi izračunane funkcijske odvisnosti je določena pretočna konstanta merilnika pretoka  $K_{KCL}$  kot smerni koeficient funkcije  $q_v = q_v(\sqrt{\Delta p})$ . Ta znaša  $K_{KCL} = 1/0,0689$ , torej velja za obravnavani KCL sledeča odvisnost

$$q_v = \frac{1}{0,0689} \cdot \sqrt{\Delta p} = 14,51 \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (5)$$

Ker je numerični izračun tokovnih razmer zgolj bolj ali manj natančna aproksimacija, rezultatov ne smemo vrednotiti po absolutni vrednosti in je zato potrebno z meritvami ugotoviti dejansko konstanto merilnika KCL. Ne glede na to pa dobljeni rezultati kažejo na uporabnost numeričnih metod pri popisu tokovnih razmer v obravnavanem računskem območju [14]. Za primerjavo smo analizirali tudi dobljene rezultate numeričnih izračunov za nestisljivo tekočino. V tem primeru se izkaže naslednje, da so pri danih hitrostnih razmerah Machova števila zelo majhna ( $Ma \ll 0,05$ ), kar ima za posledico zanemarljivo spremembo temperature tekočine v računskem območju. Pomembna ugotovitev pa je, da se pri upoštevanju stisljive tekočine spremeni lokacija, kjer se pojavljajo skrajne vrednosti statičnih tlakov na obodu KCL. Sprememba lokacije glede na nestisljivo tekočino sicer ne presega razdalje 4 mm, za natančno določitev lokacije tlačnih odjemnih mest je nujno modeliranje tekočine kot stisljivega medija.

#### 4.1.2 Porazdelitev tlaka na zunanji in notranji steni cevne geometrije

Na podlagi numeričnega izračuna se izkaže, da v našem primeru vpliv KCL na porazdelitev statičnega tlaka po stenah pretočne cevi sega v natočno

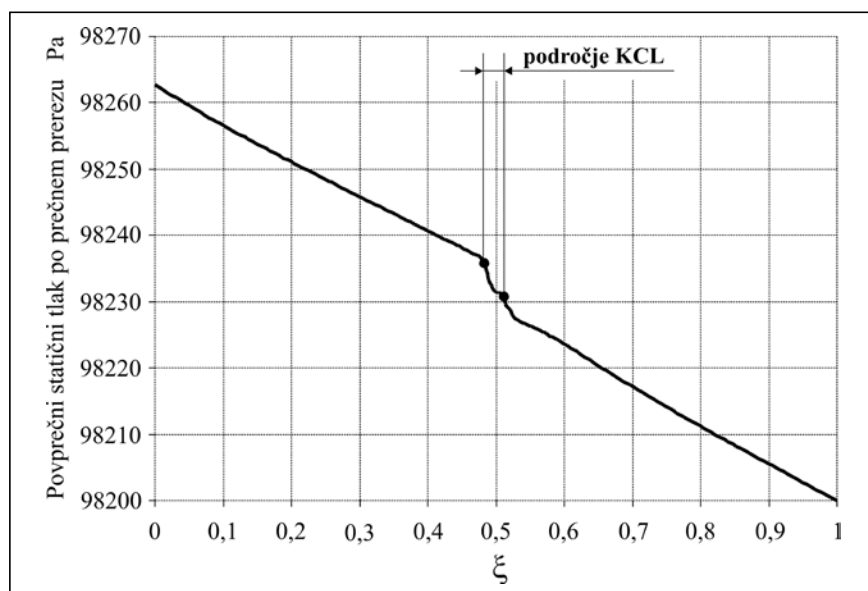


Slika 7. Odvisnost prostorninskega pretoka od največje razlike statičnega tlaka, dobljena s pomočjo numeričnega postopka

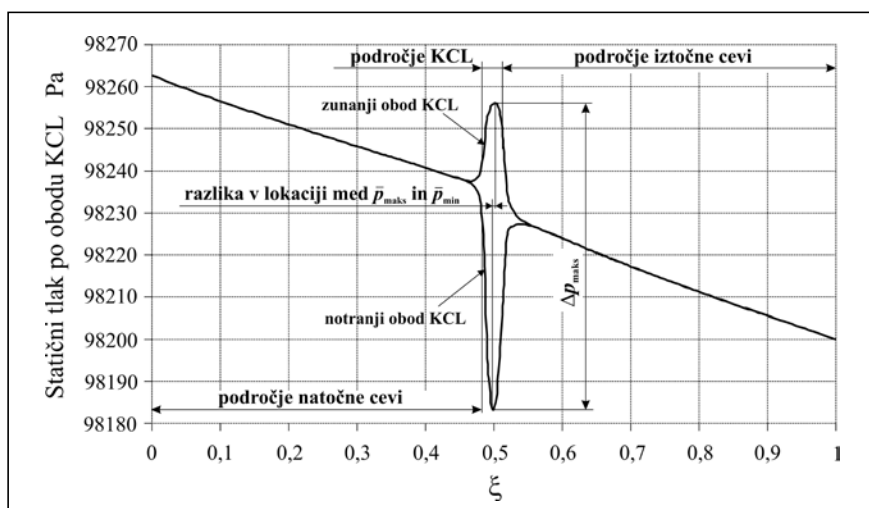
cev  $2,4 D$  od prirobnice KCL, medtem ko pa v iztočno pretočno cev sega vpliv  $3 D$  od prirobnice KCL. Ta pojav je prikazan na diagramu odvisnosti povprečnega statičnega tlaka po zunanjem in notranjem obodu računskega območja od brezdimenzijskega števila  $\xi$  (slika 8). To potrjuje pomembnost ravne natočne in iztočne cevi, kar poudarjajo tudi drugi avtorji [10]. Brezdimenzijsko število  $\xi$  je definirano kot:

$$\xi = \frac{l}{l_{\text{cel}}} \quad (6)$$

V enačbi (6) je  $l$  razdalja od vtoka v pretočno cev,  $l_{\text{cel}}$  pa dolžina celotne pretočne cevi. Razvidno je, da skrajni



Slika 9. Povprečni padec statičnega tlaka v prečni ravnini cevi vzdolž računskega območja, dobljen s pomočjo numeričnega izračuna



Slika 8. Povprečna vrednost statičnega tlaka po zunanjem in notranjem obodu pretočne cevi, dobljena s pomočjo numeričnega izračuna

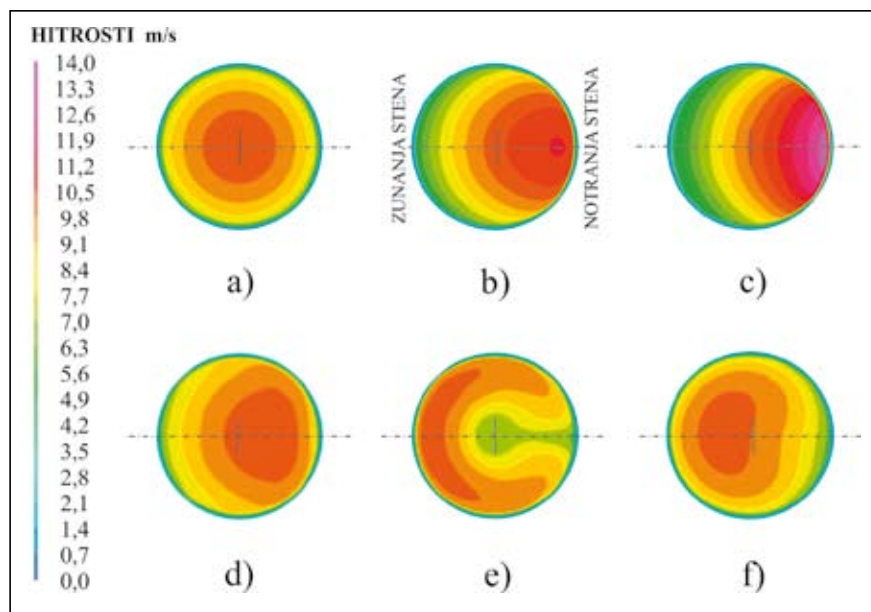
vrednosti statičnega tlaka nista v isti prečni ravnini KCL, ampak je točka najmanjšega statičnega tlaka na notranjem obodu KCL pred srednjo prečno ravnino KCL ( $45^\circ$ ), točka največjega statičnega tlaka pa nekoliko za srednjo ravnino KCL (sliki 5 in 6).

#### 4.1.3 Padec povprečnega statičnega tlaka vzdolž računskega območja

Vzdolž pretočne cevi prihaja zaradi viskoznih učinkov do padca statičnega tlaka od vtoka pa do iztoka iz cevi (slika 9). Iz poteka statičnega tlaka lahko računsko območje razdelimo na natočno cev, KCL in iztočno cev.

**Natočna cev:** v začetku natočne pretočne cevi je opazen večji gradient povprečnih statičnih tlakov vzdolž pretoka; gre za pojav izoblikovanja mejne plasti in turbulentnega toka. Nadaljnji potek statičnega tlaka je linearen vse do KCL, kar ustreza teoriji o koeficientu hidravličnih uporov v ravnem cevovodu [10].

**KCL:** v kolenu imamo povečano disipacijo energije zaradi velikih lokalnih hitrostnih gradientov, ki so posledica delovanja centrifugalnih sil. Zato se povprečna vrednost statičnega tlaka v tem delu računskega območja spreminja in doseže največji gradient, iz česar sledi, da KCL predstavlja v



Slika 10. Primerjava porazdelitve hitrosti v prečni ravnini cevne geometrije: a) 3 D pred vtokom v KCL, b) na vtoku v KCL, c) na polovici kolena (45°),

računskem območju največji lokalni upor.

Iztočna cev: za razliko od vtočne pretočne cevi je gradient povprečnega statičnega tlaka tukaj večji, kar gre pripisati sekundarnemu toku, ki se izoblikuje kot posledica delovanja KCL na tok tekočine [15].

#### 4.2 Hitrostne razmere v cevni geometriji

Za pravilno obravnavo hitrostnih razmer v KCL mora biti tok na vtoku v

krožni lok polno razvit turbulentni tok (slika 10a), [16], [17]. Na slikah 10 in 11 so prikazane hitrostne razmere vzdolž pretočne cevi. Vidna so jasno izražena področja največjih in najmanjših hitrosti. Na vtoku v KCL se statični tlak na zunanjem obodu povečuje (slika 12), zato se tam hitrost manjša, na notranji steni pa se zaradi zmanjšanja statičnega tlaka (slika 12) hitrost poveča (slika 10b, c in d). Na izstopu iz KCL so razmere obratne, in sicer: povečanje hitrosti na zunanjem in zmanjšanje na notranjem obodu (slika 10e). Slika 10f prikazuje da je

na izstopu iz računskega območja še vedno izrazit sekundarni tok (vrtinčna dvojica).

#### 4.2.1 Vrtinčni (sekundarni) tokovi

Na porazdelitev hitrosti na izstopu iz KCL vplivajo prečni tokovi, ki so posledica delovanja centrifugalnih sil na separacijo mejne plasti v KCL [15].

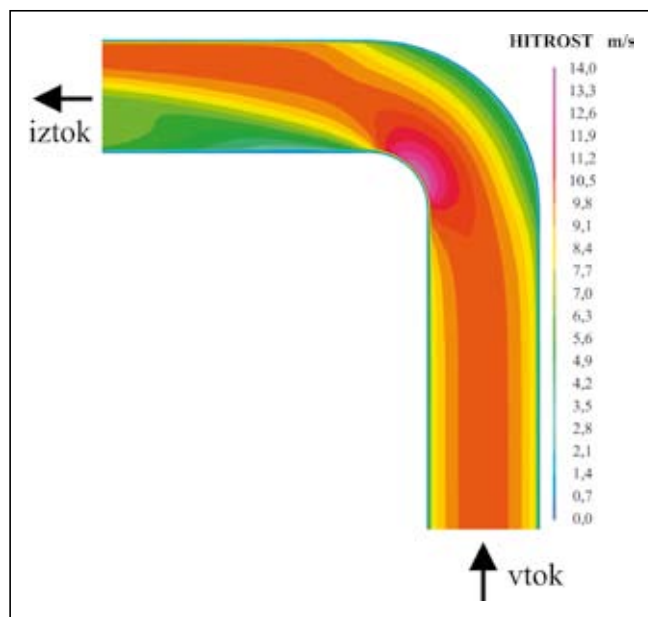
V mejni plasti ob steni (slika 13) sta vzdolž DA in FC zaradi vpliva viskoznosti nižja hitrost in manjše naraščanje tlaka od notranjega k zunanjemu radiju v primerjavi z naraščanjem tlaka vzdolž BE. Ker je tlak v E večji kot v D in F ter v B manjši kot v A in C, ima tok za KCL v radialni smeri obliko dveh vrtincev [10], [11] in [15].

Prisotnost vrtinčne dvojice smo dobili tudi z našim numeričnim izračunom (slika 14).

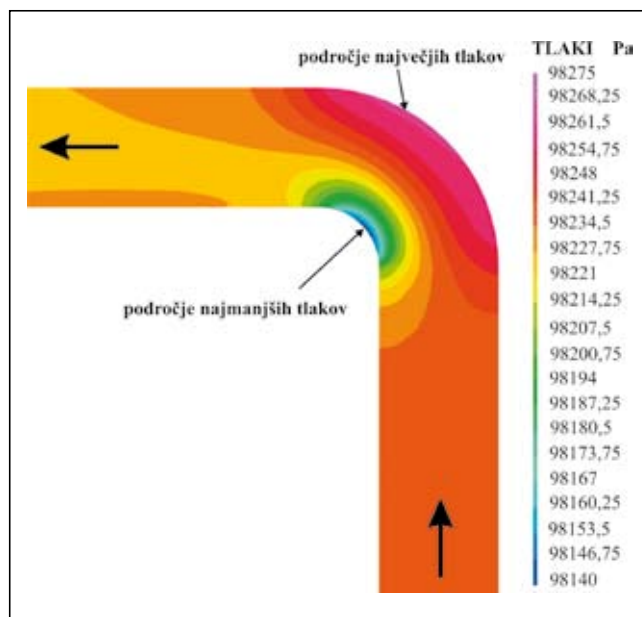
Vrtinčna dvojica je naložena na glavni tok in daje tokovnicam spiralno obliko. Lahko je prisotna še 50 do 70·D za krožnim cevnim lokom.

### 5 Sklepi

V prispevku so predstavljene nekatere od numerično dobljenih vrednosti modeliranja tridimenzionalnega turbulentnega toka viskozne stisljive

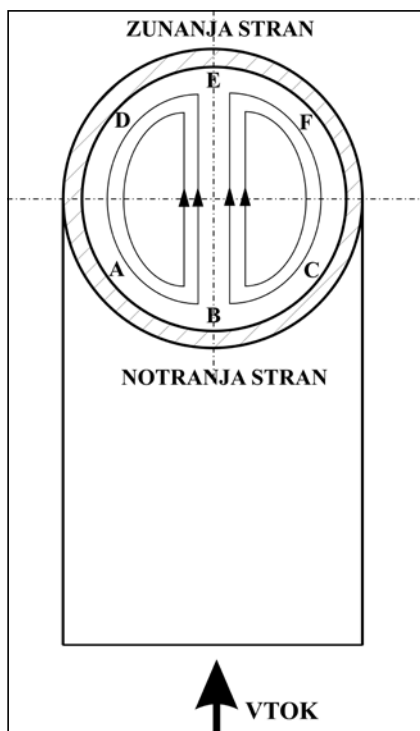


Slika 11. Hitrostne razmere v vzdolžni ravnini KCL



Slika 12. Tlačne razmere v vzdolžni ravnini KCL

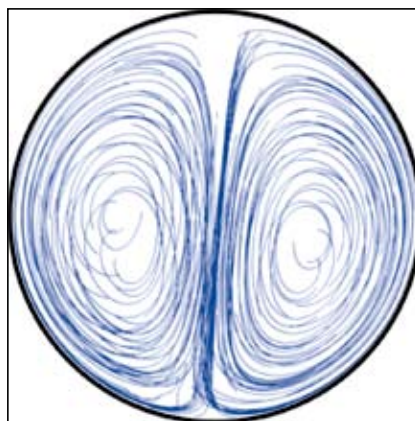




**Slika 13.** Model vrtnične dvojice [10], [11], [15]

tekočine v krožnem cevnem loku kot potencialnem merilniku prostorninskega pretoka. Izračunano je tokovno in tlačno polje vzdolž računskega območja in določena geometrijska lega skrajnih vrednosti statičnih tlakov za različne simulirane prostorninske pretoke. Na podlagi numerično izračunanih vrednosti je ugotovljeno naslednje:

- geometrijska lokacija skrajnih vrednosti statičnega tlaka na zunanjem in notranjem obodu krožnega cevnega loka je neodvisna od prostorninskega pretoka, kar je bistvenega pomena za uporabo krožnega cevnega loka kot merilnika pretoka;
- lokacija največjega statičnega tlaka na zunanjem obodu krožnega cevnega loka je pomaknjena nekoliko po toku naprej od srednje ( $45^\circ$ ) prečne ravnine, lokacija najmanjšega statičnega tlaka na notranjem obodu pa nazaj od srednje ( $45^\circ$ ) prečne ravnine krožnega cevnega loka;
- odvisnost izračunane razlike statičnih tlakov od prostorninskega pretoka ustreza kvadratni paraboli;
- numerično določena pretočna konstanta krožnega cevnega loka kot potencialnega merilnika pro-



**Slika 14.** Vrtinčna dvojica, dobljena z numeričnim izračunom

storninskega pretoka znaša:  $K_{KCL} = 14,51$ ;

- razlika statičnih tlakov pri  $45^\circ$  tlačnem odjemu ni največja razlika statičnih tlakov med notranjim in zunanjim obodom obravnava-nega krožnega cevnega loka;
- vpliv krožnega cevnega loka na tlačne razmere sega tako v natočno ( $2,4 D$  od prirobnice krožnega cevnega loka) kakor tudi iztočno cev ( $3 D$  od prirobnice krožnega cevnega loka);
- zaradi povečanih disipacijskih procesov v krožnem cevnem loku doseže statični tlak v krožnem cevnem loku največji gradient, kar pomeni, da predstavlja v računskem območju največji lokalni upor;
- ugotovljena je prisotnost prečnih tokov (vrtinčna dvojica), ki so posledica delovanja krožnega cevnega loka in so zaznavni še 50 do 70  $D$  za iztokom iz krožnega cevnega loka.

## Literatura

- [1] Bean, H.: Fluid meters: Their theory and application, Sixth Edition, Report of ASME Research Committee on Fluid Meters, American Society of Mechanical Engineering, 1971.
- [2] Košuta, R., Kutin, J., Bajsić, I.: Krožni cevni lok kot merilnik pretoka zraka, Ventil 15/ 2009 / 5, p. 424 – 431, 2009.
- [3] Miller, R. W.: Flow measurement engineering handbook, The Kingsport Press, p. 11-39–11–40, 1983.

- [4] Lansford, W. M.: The use of an elbow in a pipe line for determining the rate of flow in the pipe, Bulletin No. 289, University of Illinois, Urbana, 1936.
- [5] Malinowski, L., Rup, K.: Measurement of the fluid flow rate with use of an elbow with oval cross section, Flow Measurement and Instrumentation, 19 (2008), p. 358–363, 2008.
- [6] Sanches, S. F., Toledo V. M., Hernandez, R. J.: Experimental study for the use of elbows as flowmeters, ASME Fluids Engineering Division, Summer Meeting FEDSM, 1997.
- [7] Sanches, F., Gomez, A., Toledo, M., Quinto, P., Zurita, V.: Experimental and numerical curved flow study for metrology purpose, Journal of Applied Research and Technology, Vol. 1 (2), 2003, p. 114–126.
- [8] Rup, K., Malinowski, L.: Fluid flow identification on base of pressure difference measured on the secant of pipe elbow, Forschung im Ingenieurwesen, Springer, Berlin/Heidelberg, Vol. 70 (4), 2005.
- [9] Marn, J., Ternik, P.: Laminar flow of shear thickening in a  $90^\circ$  pipe bend, Fluid Dynamics Research, 38 (2006), p. 295–312, 2006
- [10] Idelchik, I. E.: Handbook of hydraulic resistance, Second Edition, Hemisphere Publishing Corporation, 1986, str. 265–272
- [11] Ward - Smith, A. J.: Internal fluid flow, Caredon Press-Oxford, 1980, p. 249–285.
- [12] CFX-TASCflow Computational Fluid Dynamics Software, User Documentation, Version 2.10, 2000 by AEA Technology.
- [13] Murdock, J. W., Holtz, C. J., Gregory, C.: Performance Characteristics of Elbow Flowmeters, Journal of Basic Engineering, September 1964, str. 499–506
- [14] Michael Casey and Torsten Wintergerste, Fluid Dynamics Laboratory, Sulzer Innotec: ERCOFTAC Special Interest Group on "Quality and Trust in Industrial CFD", Best Practice



Guidelines, Version 1.0, January 2000.

[15] Massey, B. S.: Mechanics of fluids, Sixth edition, Van Nostrand, Reinhold, London,

1989, str. 214–215, 251–253, 319–323

[16] ISO: ISO 9951 International Standard, Measurement of gas flow in closed conduits – Turbine

meters, First edition 1993.

[17] OIML R6 International Recommendation, General provisions for gas volume meters. Edition 1989 (E), 1989.

## Numerical Analysis of a Circular Pipe Bend Used as a Volumetric Flowmeter

**Abstract:** The article deals with the possibility of using a circular pipe bend (CPB) as an air volumetric flowmeter. The results of a 3-D numerical analysis of turbulent, viscous and compressible fluid flow in the CPB with straight inlet and outlet sections of length 28D are presented. The numerical model uses the existing geometry of the CPB and includes the boundary conditions characteristic for the test rig, which was used for the preliminary experimental investigations of the prototype flowmeter. Different flow boundary conditions were analyzed. The maximum difference between the pressures on the inside and the outside edge of the CPB as well as the positions of the points where the extreme values of the static pressures were predicted for various simulated air-flow rates using the simulation results. Based on the results of the numerical analysis, it was established that the positions of the pressure magnitudes on the inside and outside edges do not change with the volume flow rate. The functional relationship was determined between the calculated maximum pressure difference and the volume flow rate, which represents the calculated flow constant of the flowmeter. In addition to that, the flow constant was also determined for a conventional pressure-difference measurement with pressure taps positioned at an angle of 45° in the CPB. The pressure losses and the generated swirl flows at the outlet of the CPB are shown in terms of the pressure and velocity conditions in the computational domain, respectively.

**Keywords:** Circular pipe bend, numerical analysis, volume flow, air, static pressure

### Packaging

Pakiranje s pomočjo ultrazvoka je hitro, zanesljivo in okolju prijazno.

### Mnoge prednosti

Praktično posoda, kjer se proizvajajo pakirni materiali in laminati iz termo plastičnih umetnih mas ali drugi materiali z odgovarjajočo prevleko, prinese integracija ultrazvočne tehnologije v proizvodne procese mnoge prednosti. Znižanje energijskih stroškov in zanesljivo spajanje tudi z nečistočami prevlečenih spojin površin.

### Posledica

Višja produktivnost, površina gospodarnost in boljša kvaliteta.

### Standardni moduli za mnogoštevilne oblike embalaže

Stoječe in ležeče vreče

Cevne vreče HFFS in VFFS

Kartonska embalaža

Blister, skodelice, lončki, trays

### Dodatne prednosti

Integrirano varjenje, pečatenje in rezanje

