

# Analiza novih oblika mernih blendi primenom računarske dinamike fluida

Dragan P. Halas<sup>1</sup>, Oskar J. Bera<sup>2</sup>, Radovan P. Omorjan<sup>2</sup>, Aleksandar A. Rajić<sup>1</sup>, Danijela M. Jašin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin, Srbija

<sup>2</sup>Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet Novi Sad, Novi Sad, Srbija

## Izvod

U mnogim granama tehnike javljaju se problemi merenja protoka fluida. Merne blende, zbog svojih mnogih prednosti predstavljaju najzastupljeniji instrument za merenje protoka fluida kroz cevovode. Sa druge strane njihova upotreba povećava troškove rada industrijskih postrojenja i cevovoda. U ovom radu dizajnirana su i ispitana tri nova oblika mernih blendi. Njihov cilj je bio ušteda energije, a samim tim i smanjenje troškova rada. Novi oblici mernih blendi, kao i jedna standardnog oblika koja je poslužila kao referentna, dizajnirani su u programskom paketu SolidWorks. Ušteda energije je postignuta dizajnom koji smanjuje otpor merne blende kao elementa cevovoda. Zatim su, prema predloženom algoritmu, dizajnirani oblici ispitani pomoću simulacije računarske dinamike fluida (RDF) u programskom paketu COMSOL Multiphysics i primenom tehnologije 3D štampanja, FDM postupkom (eng. Fused Deposition Modeling), izrađeni i ispitani u laboratorijskim uslovima. Rezultati laboratorijskih ispitivanja su prikazani uporedo sa rezultatima RDF simulacije. Dobijeni rezultati pokazuju znatan efekat uštede energije. Utvrđeno je da se pomoću RDF simulacije mogu dobiti podaci na osnovu kojih se može doneti odluka da li novi oblik merne blende treba korigovati ili ima smisla pristupiti laboratorijskom ispitivanju.

**Ključne reči:** merenje protoka; računarska simulacija; strujanje fluida; ušteda energije; 3D štampa.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

NAUČNI RAD

UDC:

66.026.2+ 66.012.1+ 004.4: 66.012.3

Hem. Ind. 73 (5) 311–323 (2019)

## 1. UVOD

Problemi merenja protoka fluida javljaju se u mnogim granama tehnike, kao što je procesna industrija, snabdevanje vodom, odvođenje otpadnih voda i slično. Merne blende predstavljaju najzastupljeniji instrument za merenje protoka fluida koji protiču kroz cevovod. One imaju mnoge prednosti u odnosu na druge instrumente kao što su jednostavna konstrukcija, niski troškovi rada, laka ugradnja i zamena, i nepostojanje pokretnih delova. Mogu se koristiti i pod ekstremnim uslovima pritiska i temperature. Takođe se mogu koristiti i za merenje protoka agresivnih fluida. Merne blende rade na jednostavnom principu promene brzine i pritiska fluida uzrokovanih privremenim smanjenjem raspoložive površine poprečnog toka fluida. Lokalno smanjenje poprečnog preseka toka fluida se postiže pomoću prstena koji sužava tok fluida. Ujedno, to suženje prouzrokuje nagli pad pritiska, odnosno stvaranje razlike pritisaka neposredno pre i posle merne blende. Merenjem pada apsolutnog statičkog pritiska fluida na mernim mestima neposredno pre i posle merne blende ( $\Delta p$ ) dobija se podatak o padu pritiska koji daje mogućnost za određivanje protoka. Posledica tog privremenog suženja toka fluida je takođe i otpor merne blende kao elementa cevovoda koji daje pad apsolutnog statičkog pritiska fluida ( $\Delta \omega$ ) koji se mora nadoknaditi i koji samim tim povećava troškove rada industrijskih postrojenja i cevovoda. Međutim, osim vrednosti  $\Delta \omega$  bitna je i preciznost merenja protoka pomoću merne blende. Ako se  $\Delta p$  ne menja dovoljno brzo i ako ne može biti merljiv sa promenom protoka, onda se protok ne može izmeriti sa zadovoljavajućom preciznošću.

Korespondencija: Dragan P. Halas, Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Đorđa Stratimirovića 23, 23 000 Zrenjanin, Srbija; Tel. 0605430666

E-mail: [draganhalas@gmail.com](mailto:draganhalas@gmail.com)

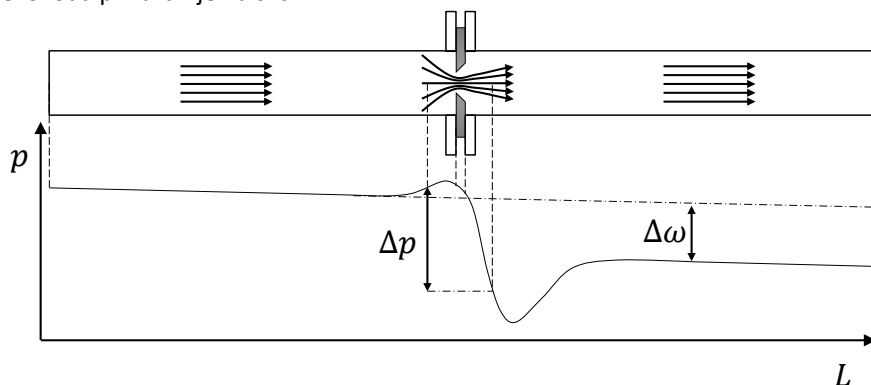
Rad primljen: 22. jula 2018.

Rad prihvaćen: 28. oktobra 2019.

<https://doi.org/10.2298/HEMIND190722030H>



Apsolutni statički pritisak fluida pre nailaska na mernu blendu opada linearno zbog podužnog otpora. Nailaskom fluida na prednju stranu merne blende vrednost pritiska prvo blago raste zbog udara fluida u nju. Pri prolasku fluida kroz otvor na mernoj blendi vrednost pritiska opada usled otpora merne blende, sve dok ne dostigne minimalnu vrednost, nakon čega se ponovo povećava. Pritisak se povećava do vrednosti koja je manja od vrednosti pritiska pre nailaska na mernu blendu, nakon čega ponovo opada linearno zbog podužnog otpora. Profil promene vrednosti pritiska po dužini cevovoda prikazan je na slici 1.



Slika 1. Profil apsolutnog statičkog pritiska fluida na zid cevi

Figure 1. Absolute static pressure profile of the fluid on the pipe wall

Postoje tri standardna tipa mernih blendi, koji su propisani međunarodnim standardima: ISO 5167-1:2003 [1], i ISO 5167-2:2003 [2], a koji se razlikuju po položaju mernih priključaka na kojima se meri  $\Delta p$ :

- merne blende sa mernim priključcima na rastojanju  $D$  i  $D/2$  od merne blende,
- merne blende sa mernim priključcima smeštenim u prirubnicama,
- merne blende sa mernim priključcima pod uglom.

Ovde  $D$  predstavlja unutrašnji prečnik cevovoda. Merni priključci moraju biti na istoj ravni, odnosno na zamišljenoj liniji na zidu cevi koji prati tok fluida.

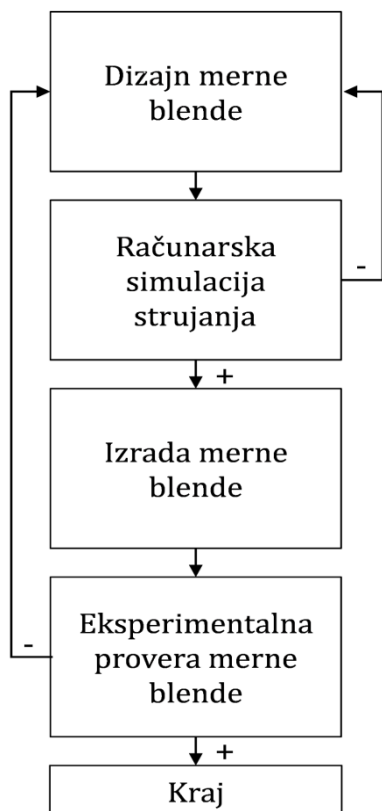
Mnogi autori su ispitivali različite oblike mernih blendi u cilju smanjenja  $\Delta\omega$  čime bi se dobila ušteda energije, a samim tim i smanjenje troškova rada, ali uz zadovoljavajuću preciznost merenja, koja se manifestuje padom pritiska  $\Delta p$ . Postoji veliki broj radova u kojima se proučavaju merne blende. U početnim istraživanjima su se eksperimentalno ispitivali standardni oblici mernih blendi i poredili sa postavljenim matematičkim modelima u cilju optimizacije potrošnje energije i tačnosti merenja protoka, a jedan pravac istraživanja se kretao ka predlaganju novih oblika mernih blendi. Novi oblici mernih blendi su ispitivani u laboratorijskim uslovima [3-7]. Rezultati tih ispitivanja su poređeni sa rezultatima prethodnih istraživanja ili su postavljani matematički modeli, koji su zatim poređeni sa eksperimentalnim rezultatima [8-14]. Rešavanje sistema diferencijalnih jednačina, koje je bilo neophodno rešiti da bi se rešili ovi matematički modeli, bio je dug i mukotrpan proces.

Naglim razvojem brzine i kapaciteta računara, sve više se razvija oblast računarske dinamike fluida (eng. Computational Fluid Dynamics, CFD), pomoću koje je moguće rešavanje postavljenih sistema diferencijalnih jednačina pomoću različitih softverskih paketa (npr. SolidWorks Flow Simulation, COMSOL Multiphysics, Ansys Fluent). Razvojem računarske dinamike fluida (u daljem tekstu RDF) olakšano je ispitivanje uticaja geometrije i parametara procesa na strujanje fluida i raspodelu brzina. Rezultati se dobijaju u obliku grafičkih prikaza ili u numeričkom obliku. Mnogi autori su koristili RDF simulacije u proveru efekata novih predloženih oblika mernih blendi [9,14-17] ili su proveravali tačnost RDF simulacija poredeći ih sa ranijim rezultatima istraživanja [16,17,19-23], ili rezultatima eksperimenata [9,10,12,13,15,21,22,24,25]. Ispitivane su i razne mogućnosti merenja razlike pritiska, kao što je upotreba mikrosenzora [9]. Poređenje eksperimentalnih rezultata i kompjuterske simulacije raznih oblika mernih blendi je korišćeno i u obrazovne svrhe [10].

Rezultate simulacije, ma koliko detaljni i precizni bili, ako daju zadovoljavajuće rezultate, potrebno je potvrditi u laboratorijskim uslovima ili u radu. Za to je potrebno napraviti ispitane oblike mernih blendi što je takođe skup proces koji zahteva vreme i resurse. Pojavom 3D štampača, postalo je moguće na brz i efikasan način bilo koji predmet koji je

konstruisan u nekom od softverskih paketa za crtanje, poslati direktno na izradu pomoću 3D štampe. Tako se i predloženi oblici mernih blendi mogu lako, brzo i precizno izraditi pomoću 3D štampe, a zatim koristiti za laboratorijska ispitivanja.

U ovom radu je predložen metod brzog i efikasnog ispitivanja novih oblika mernih blendi primenom tehnologije 3D štampanja i RDF simulacije, da bi se postigala manja vrednost  $\Delta\omega$  uz zadovoljavajuću preciznost merenja protoka. Dizajnirani su i ispitani novi oblici mernih mernih blendi koji daju uštedu energije tokom rada. Na slici 2 prikazan je algoritam toka ispitivanja.



Slika 2. Algoritam ispitivanja novih oblika mernih blendi  
Figure 2. Algorithm for testing new orifice plate shapes

Predloženi oblici mernih blendi, kao i merna blenda standardnog oblika i dimenzija koja služi za poređenje kao referentna, konstruišu se u programskom paketu SolidWorks. Zatim sledi simulacija u programskom paketu COMSOL Multiphysics. U slučaju nezadovoljavajućih rezultata simulacije vrši se korekcija dizajna, a u slučaju zadovoljavajućih rezultata merne blende se izrađuju pomoću 3D štampanja. Nakon toga se testiraju u laboratorijskim uslovima.

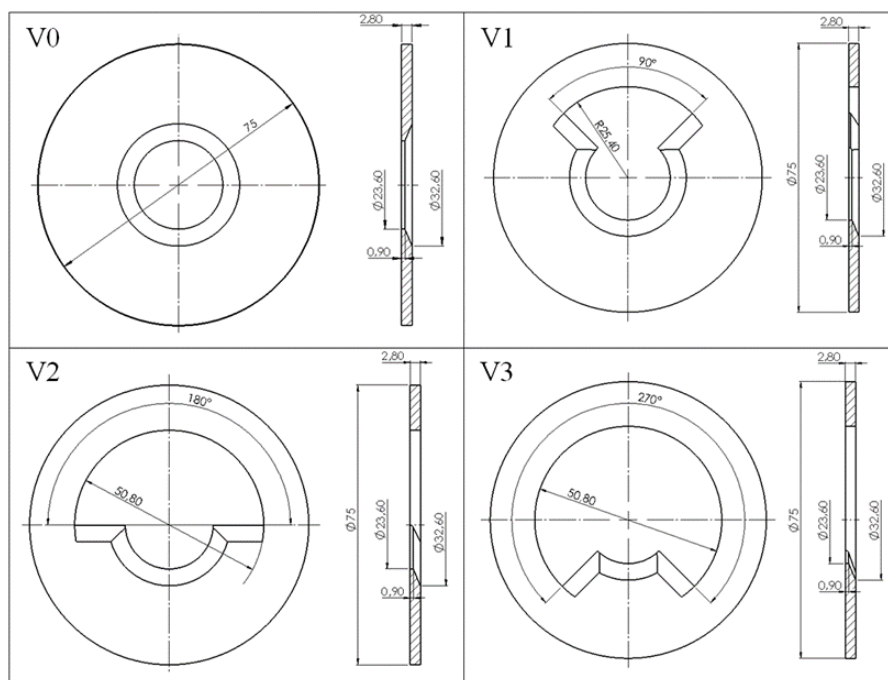
## 2. EKSPERIMENTALNI DEO

### 2. 1. Predloženi oblici mernih blendi

Prvi korak eksperimenta podrazumevao je dizajniranje novih oblika mernih blendi. Merne blende su dizajnirane u programskom paketu SolidWorks Premium 2015 (Dessault Systemes, Francuska). Novi oblici mernih blendi, predloženi i ispitivani u ovom radu, kao i referentna koja je služila za poređenje, prikazani su na slici 3.

U ovom radu dizajnirana je serija od četiri merne blende (od V0 do V3) koje se razlikuju po obliku (slika 3). Prva merna blenda (V0) ima standardan oblik i dimenzije prema ISO 5167-2:2003 standardu [1,2]. Konstrukcija ostale 3 je takva da je unutrašnji otvor kroz koji teče fluid ostao isti kao i u verziji V0, a zatvoreni deo merne blende (prsten) smanjivan je za po jednu četvrtinu prstena više u svakoj verziji. Verzija V1 ima isečen deo prstena u gornjem delu od 90°, verzija V2 od 180°, a verzija V3 od 270°. Takvim dizajnom je smanjen otpor protoku fluida povećanjem dela poprečnog preseka dostupnog za protok. Položaj svih isečenih delova prstena je nasuprot položaju izvoda za merenje razlike

pritisaka. Ovakvim konstrukcijama mernih blendi omogućava se protok fluida u onim oblastima gde se ne nalaze merna mesta za merenje  $\Delta p$ , što smanjuje  $\Delta \omega$ .



Slika 3. Merne blende dizajnirane u programskom paketu SolidWorks  
Figure 3. Orifice plates designed in the SolidWorks software package

## 2. 2. RDF simulacija

Drugi korak eksperimenta sastojao se od RDF simulacija strujanja fluida. Simulacije strujanja fluida kroz cev sa ugrađenim mernim blendama izvedene su pomoću programa COMSOL Multiphysics 5.2 (COMSOL Inc., SAD), metodom konačnih razlika. Upotrebljena je PARDISO direktna numerička metoda zasnovana na LU dekompoziciji matrice. Zadana relativna tolerancija stacionarne numeričke metode iznosila je 0,001. Jednačine koje su upotrebljene prilikom simulacije proticanja fluida zasnivaju se na Reynoldsovom obliku Navije-Stoksove jednačine - RANS modelu (eng. Reynolds-averaged Navier–Stokes) i jednačini kontinuiteta za nestišljiv fluid:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u = -\nabla p + \nabla \left( (v + v_T) (\nabla u + \nabla u^T) \right) \quad (1)$$

$$\nabla u = 0 \quad (2)$$

gde je  $\nu$  kinematička viskoznost i zavisi, pri konstantnoj temperaturi, isključivo od prirode fluida,  $T$  predstavlja turbulentni doprinos, dok  $\nu_T$  predstavlja turbulentnu viskoznost i ima za cilj da prikaže uticaj fluktuirajuće brzine usled turbulencije. U ovom radu je korišćen  $k$ - $\varepsilon$  model za opisivanje turbulentne viskoznosti:

$$\nu_T = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

gde je  $k$  turbulentna kinetička energija, a  $\varepsilon$  brzina disipacije. Konstanta  $C_\mu$  iznosi 0,09.

Da bi sistem parcijalnih diferencijalnih jednačina bio rešiv neophodno je postaviti jednačine koje definišu promenu parametara  $k$  i  $\varepsilon$ :

$$\frac{dk}{dt} + \nabla \left( k u - \frac{\nu_T}{\sigma_k} \nabla k \right) = P_k - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \nabla \left( \varepsilon \mathbf{u} - \frac{\mathbf{v}_T}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) = \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \varepsilon) \quad (5)$$

gde je  $P_k$ :

$$P_k = \frac{\mathbf{v}_T}{2} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)^2 \quad (6)$$

a usvojene vrednosti konstanti:  $C_1 = 1,44$ ,  $C_2 = 1,92$ ,  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  su preuzete iz literature [26]. Takođe, ove vrednosti programski paket COMSOL Multiphysics uzima kao osnovne za  $k - \varepsilon$  model.

Prilikom rešavanja navedenih jednačina, postavljeni su granični uslovi neophodni za dobijanje rešenja pri stacionarnom strujanju. Zadana brzina fluida na ulazu u cev je uniformna i iznosi 0,2959 m/s, što odgovara zapreminskom protoku od  $0,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  i vrednosti Rejnoldsovog broja od 15032. Ova vrednost Rejnoldsovog broja se nalazi u turbulentnom opsegu. Pritisku na izlazu iz cevi je dodeljena vrednost atmosferskog pritiska (manometarski pritisak je iznosio 0 Pa). Na zidu cevi i merne blende važi da je  $u = 0 \text{ m s}^{-1}$  (nema „klizanja“, eng. no slip condition). Fizička svojstva vode su preuzeta iz baze podataka programa za temperaturu od  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Da bi se primenom konačnih razlika dobilo i prikazalo rešenje, prvo je neophodno postaviti mrežu konačnih razlika (eng. mesh). Ispitane su predefinisane mreže različitih gustina i oblika. Zbog jednostavne geometrije i simetrije problema, nije uočen značajan uticaj tipa mreže na dobijene rezultate za mernu blendu V0. U cilju skraćivanja vremena simulacije (dostizanja konvergencije) i dobijanja rezultata odgovarajuće rezolucije, za sve ispitivane merne blende upotrebljena je predefinisana gruba mreža kontrolisana geometrijom i vrstom strujanja (eng. physics-controlled mesh, coarse mesh). Dobijene mreže za sve dizajnirane merne blende su prikazane na slici 4, dok su parametri mreža prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Parametri mreža korišćenih u RDF simulaciji

Table 1. Network parameters used in CFD simulation

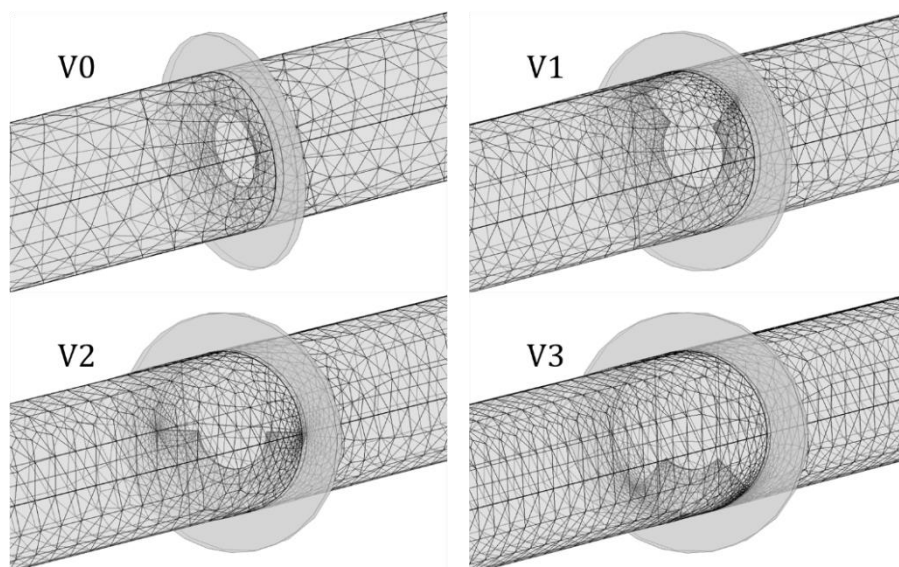
Merna blenda		V0			V1		
Broj čvorova		23137			26967		
Ukupan broj elemenata		63926			75665		
Tip elementa	Tetraedar	Piramida	Prizma	Tetraedar	Piramida	Prizma	
Broj	32080	331	31515	38925	575	36165	
Merna blenda		V2			V3		
Broj čvorova		26546			26097		
Ukupan broj elemenata		74168			72496		
Tip elementa	Tetraedar	Piramida	Prizma	Tetraedar	Piramida	Prizma	
Broj	37870	470	35828	36664	383	35449	

U programski paketu SolidWorks kreirani su CAD (eng. Computer-Aided Design) modeli mernih blendi i prebačeni u datoteke sa ekstenzijom STL (eng. Standard Tessellation Language) koje su upotrebljene za izradu mernih blendi na 3D štampaču i u RDF simulaciji u programskom paketu COMSOL Multiphysics.

### 2. 3. Izrada mernih blendi

Naredni korak eksperimenta je bila izrada ispitivanih oblika mernih blendi. Merne blende su izrađene na „NEO 3D“ printeru (*German Reprap GmbH*, Nemačka). Ovaj 3D štampač predmete izrađuje FDM postupkom (eng. Fused Deposition Modeling), odnosno modeliranjem nanošenjem rastopljenog materijala.

Merne blende su napravljene od biorazgradivog termoplastičnog polimera PLA (poli(mlečna kiselina)), Cool Red PLA Spool (PLA 100327, German RepRap GmbH, Nemačka). U tabeli 2 su prikazani osnovni parametri izrade mernih blendi na 3D štampaču.

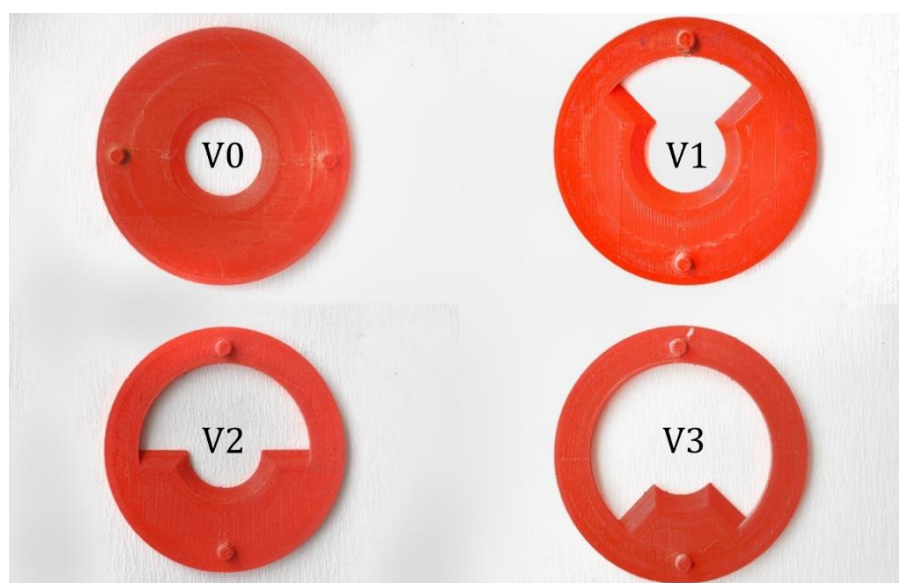


Slika 4. Mreže konačnih razlika korišćene za ispitivane merne blende  
 Figure 4. Finite difference networks used for the test orifice plates

Tabela 2. Osnovni parametri izrade mernih blendi na 3D štampaču  
 Table 2. Main parameters for the production of orifice plates on a 3D printer

Parametar izrade	Vrednost
Debljina sloja	0,2 mm
Temperatura materijala	210 °C
Brzina štampe	70 mm s <sup>-1</sup>
Gustina popune	20 %
Vreme izrade	55 min
Materijal izrade	Cool Red PLA Spool

Na slici 5 prikazane su merne blende izrađene na 3D štampaču za potrebe eksperimentalne provere.

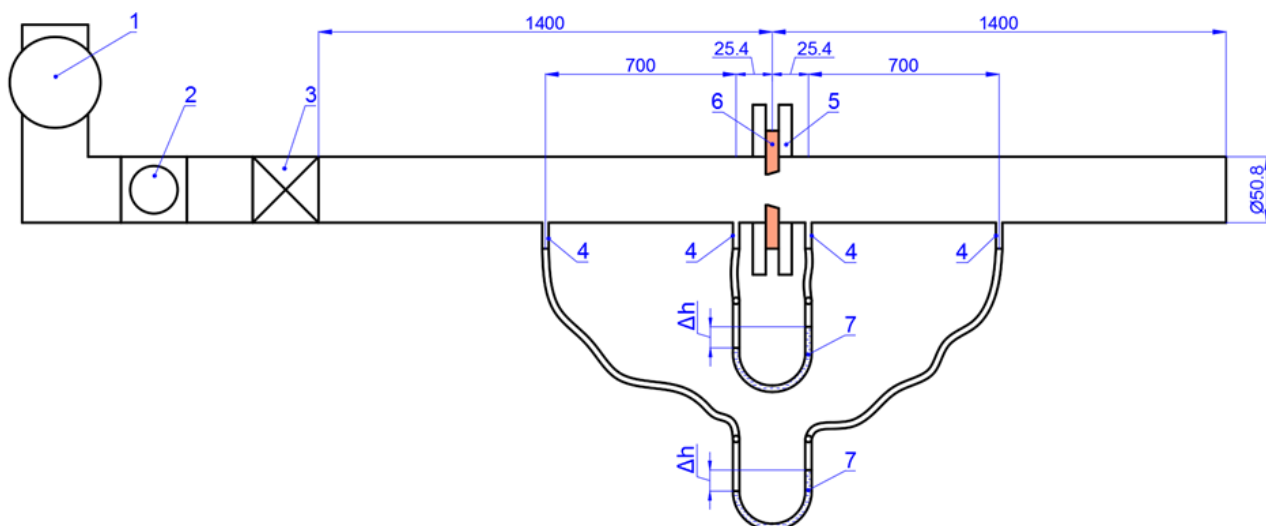


Slika 5. Merne blende izrađene 3D štampom za potrebe eksperimentalne provere  
 Figure 5. Orifice plates made by 3D printing for experimental tests.



## 2. 4. Laboratorijsko ispitivanje predloženih oblika mernih blendi

Sledeći korak je bila eksperimentalna provera mernih blendi. Laboratorijska aparatura za eksperimentalnu proveru konstruisana je i napravljena tako da omogući jednostavan rad, laku promenu mernih blendi i preciznu kontrolu procesa. Šematski prikaz eksperimentalne aparature upotrebljene za ispitivanje novih oblika mernih blendi u ovom radu, dat je na slici 6.



Slika 6. Šematski prikaz laboratorijske aparature za ispitivanje mernih blendi

Figure 6. Schematic presentation of the laboratory system for testing of orifice plates

Linija se sastoji od dve bešavne čelične cevi, koje su spojene prirubnicama (5). Između prirubnica se umeće merna blenda koja se ispituje (6). Izvodi za merenje razlike pritisaka (4) su spojeni sa „U“ manometrima (7). Voda iz pumpe (1) prolazi kroz merač protoka (2), a zatim kroz kuglični ventil (3), koji služi za regulaciju protoka. Nakon toga voda prolazi kroz mernu blendu (1) i ističe iz linije u rezervoar. Isticanje fluida na kraju linije je slobodno. Izvodi za merenje razlike pritisaka fluida na mernim mestima neposredno pre i posle merne blende se nalaze na 25,4 mm od čeonog dela merne blende, kako predviđa standard ISO 5167-2:2003 [2]. Izvodi za merenje razlike pritisaka merne blende kao elementa cevovoda se nalaze na 700 mm uzvodno i nizvodno od od čeonog dela merne blende. Svi merni priključci su postavljeni u istoj ravni, odnosno na zamišljenoj liniji na zidu cevi koja prati tok fluida.

Razlike pritisaka su merene pomoću diferencijalnih „U“ manometara (7). Kao radna tečnost je korišćen  $\text{CHCl}_3$  (trihlormetan, POSH SA, Poljska), obojen crvenom organskom bojom Sudan III ((1-(4-(fenilazo)fenilazo)-2-naftol), Carlo Erba, Italija), radi lakšeg očitavanja. Očitavane vrednosti razlika visina stubova tečnosti su se pretvarale u razliku pritisaka pomoću jednačine diferencijalnog „U“ manometra:

$$\Delta p = (\rho_{\text{CHCl}_3} - \rho_{\text{H}_2\text{O}})gh \quad (7)$$

Preciznost očitavanja razlike visina stubova radne tečnosti je bila 1 mm, tako da je po jednačini (7) dobijena standardna greška od 4,7 Pa. U eksperimentu su ispitivani predloženi oblici mernih blendi pri konstantnoj temperaturi vode i okoline i pri istom zapreminskom protoku. Merene su razlike pritisaka očitavanjem vrednosti razlika visina stubova tečnosti. Za svaku mernu blendu je vršena serija od po 5 očitavanja vrednosti u razmaku od po 5 s. Očitavanja su slikana fotoaparatom i naknadno očitavana sa slika na računaru. Na osnovu srednje vrednosti očitavanja usvojena je razlika visine stubova radne tečnosti. Razlike u očitavanjima u okviru jedne serije merenja nije bila veća od 3 mm, što je bila potvrda stacionarnog stanja. Na laboratorijskoj liniji izvršena su četiri serije merenja, svaka sa jednim od predloženih oblika merne blende. Ispitivani fluid je bio voda, temperatura fluida i okoline je bila  $T = 20 \pm 1$  °C. Zapremiski protok fluida je bio  $V_{\text{zap}} = 0,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Brzina strujanja fluida je bila  $w = 0,2959 \text{ m s}^{-1}$ . Isticanje fluida iz laboratorijske linije je bilo slobodno, odnosno pritisak na izlazu iz linije je bio atmosferski.

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

#### 3. 1. Rezultati RDF simulacije

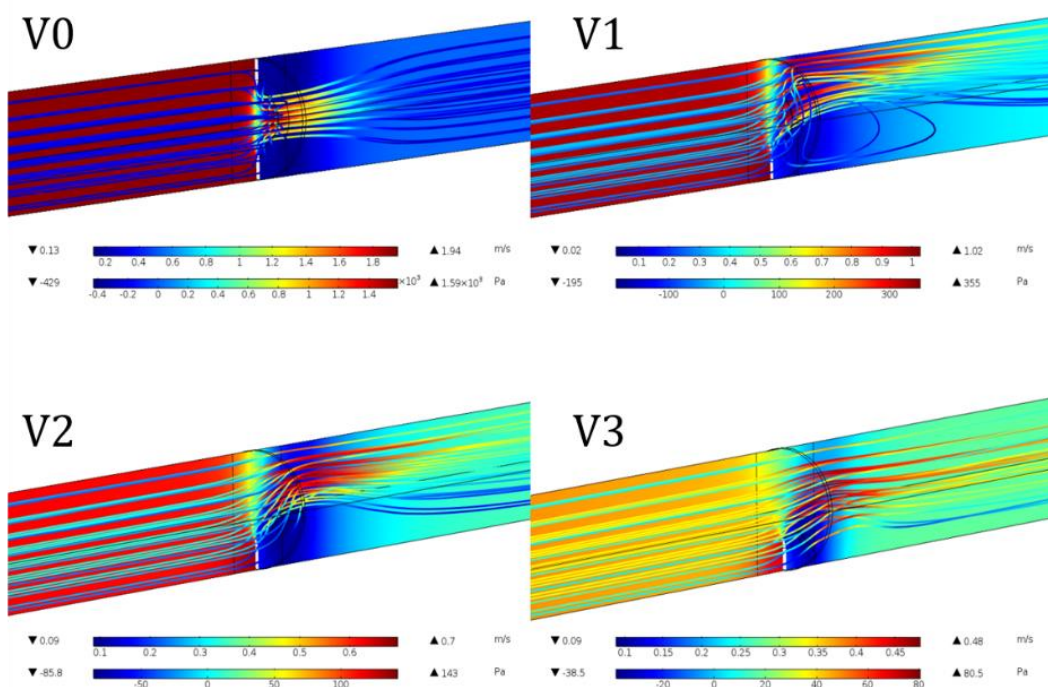
Sve simulacije strujanja fluida kroz cev u prisustvu mernih blendi su uspešno izvedene. Podaci konvergencije i iterativnog postupka dati su u tabeli 3. Niske vrednosti procenjene greške i mali broj iteracija potvrđuju dobru konvergenciju kao i validnost dobijenih rezultata, koja je potvrđena i eksperimentalno.

Tabela 3. Podaci konvergencije i iterativnog postupka simulacije

Table 3. Convergence and iterative simulation process data

Merna blenda	Broj iteracija	Vreme simulacije, s	Procene greške rešenja za odvojene grupe
V0	58	559	0,0006 i 0,00016
V1	50	596	$6,4 \times 10^{-5}$ i 0,00017
V2	39	473	$5 \times 10^{-5}$ i 0,00018
V3	51	592	$2,4 \times 10^{-5}$ i 0,00019

Tok i brzine fluida, kao i profili pritiska dobijeni kao rezultati simulacija u programskom paketu *COMSOL Multiphysics* su prikazani na slici 7. Tok i brzina fluida duž x ose cevovoda su prikazani pomoću strujnica. Na slici 7 se uočava, da je kod verzije V0 tok fluida osno simetričan u odnosu na x osu toka fluida. Strujnice se ravnomerno sužavaju, a vrednosti brzina strujnica se povećavaju prolaskom kroz mernu blendu. Kod ostalih verzija mernih blendi, tok fluida nije osno simetričan u odnosu na x osu toka fluida što je očekivano. Tok fluida je pomeren ka delu poprečnog preseka mernih blendi koji je oslobođen za njihov tok.



Slika 7. Grafički prikaz simulacija protoka kroz merne blende V0 – V3 dobijenih primenom programskog paketa *COMSOL Multiphysics*

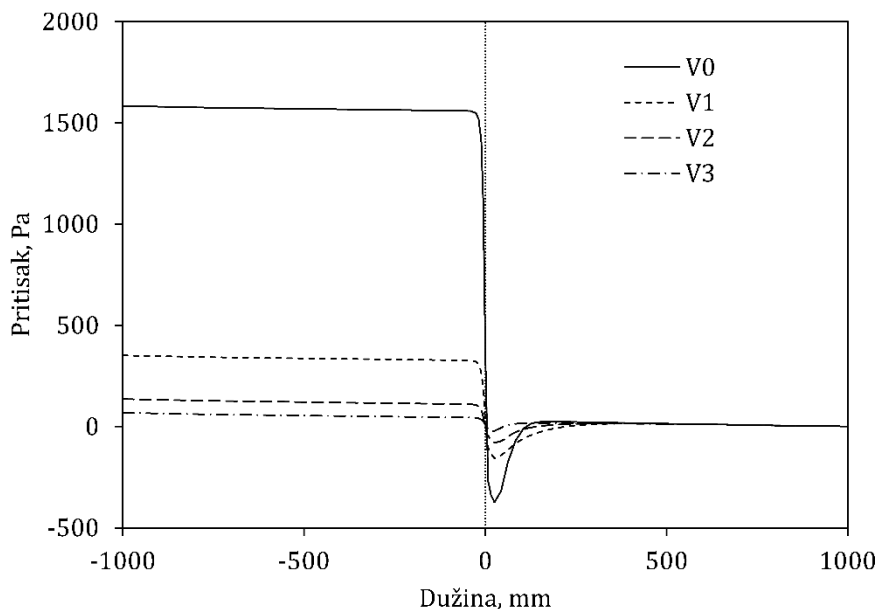
Figure 7. Graphical representation of fluid flow simulation results for orifice plates V0 – V3 obtained by the *COMSOL Multiphysics* software package

Profili pritiska fluida duž x ose cevovoda su prikazani pomoću palete boja koje ispunjavaju prostor cevovoda. Sa slike 7 se može uočiti da je kod verzije V0 pad pritiska osno simetričan u odnosu na x osu. Kod ostalih verzija mernih blendi



vrednosti pada pritiska u oblastima gde je deo poprečnog preseka merne blende oslobođen za tok fluida, su manje nego u delu koji je ostao nepromenjen.

Posmatrajući strujnice na slici 7 se može zaključiti da je tok fluida uzvodno od merne blende uniforman, što je i jedan od uslova po ISO 5167-2:2003 standardu [2,3]. Profili pritiska fluida na zid cevi dobijeni kao rezultat simulacija su prikazani na slici 8 za sve četiri verzije merne blende zajedno.



Slika 8. Profili pritiska fluida na zid cevi duž linije za ispitivanje dobijeni simulacijom u programskom paketu COMSOL Multiphysics za sva četiri predložena oblika mernih blendi

Figure 8. Fluid pressure profiles on the tube wall along the test line obtained by simulation in the COMSOL Multiphysics software package for all four proposed shapes of orifice plates

Na x osi grafika (slika 8) je predstavljena dužina linije za ispitivanje pri čemu vrednost  $x = 0$  mm predstavlja mesto gde se nalazi merna blenda. Na y osi je predstavljen pritisak. Može se uočiti karakterističan oblik profila pritiska sličan profilu datom na slici 1. Međutim, tačka dostizanja minimalnog pritiska za četiri ispitivana oblika mernih blendi je različita. Kod standardnog oblika merne blende (V0) je najudaljenija od merne blende, a kako se povećava površina merne blende kroz koju teče fluid, tačka dostizanja minimalnog pritiska se približava mernoj blendi. Sa grafika se takođe može uočiti da je izlazni pritisak za sve četiri simulacije jednak.

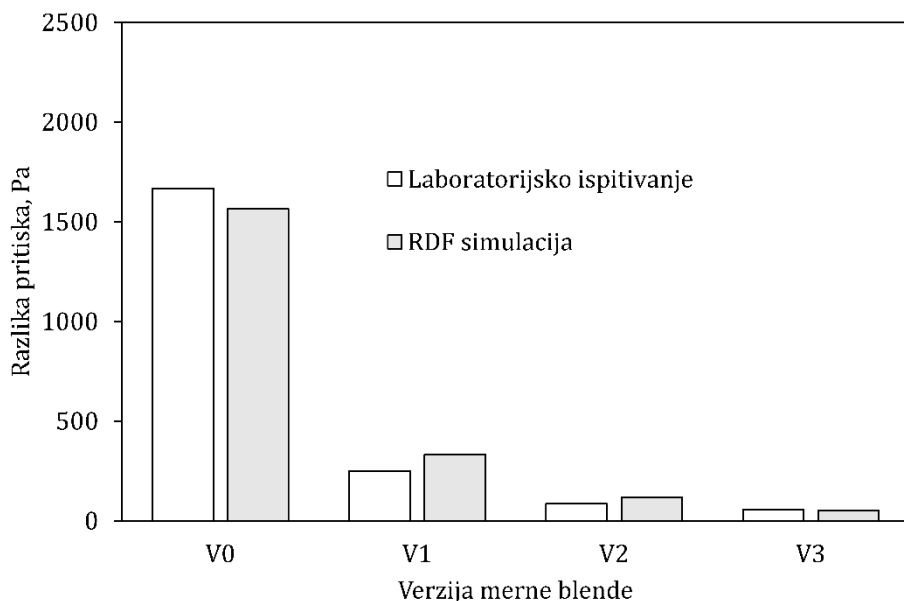
### 3. 2. Rezultati laboratorijskog ispitivanja

Na slici 9 su prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja  $\Delta\omega$  uporedo sa rezultatima RDF simulacije.

Na y osi grafika na slici 9 nalaze se vrednosti razlike pritiska, na udaljenosti od 700 mm pre i posle merne blende. Na slici 10 su prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja  $\Delta p$  uporedo sa rezultatima RDF simulacije.

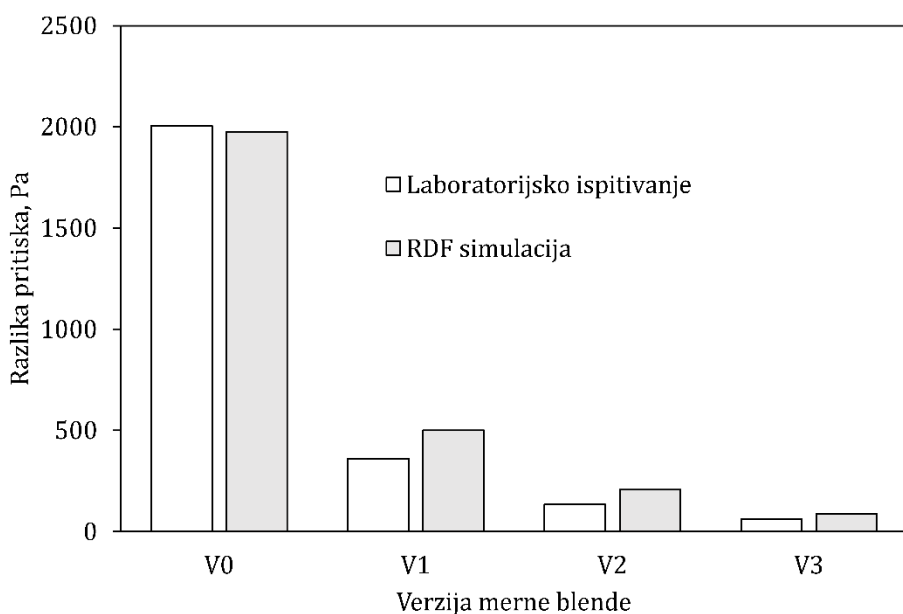
Na y osi grafika na slici 10 nalaze se vrednosti razlike pritiska, na udaljenosti od 25,4 mm pre i posle merne blende, na mestima gde se meri razlika pritiska koja služi za izračunavanje protoka fluida.

Posmatrajući razliku između laboratorijskih vrednosti i vrednosti RDF simulacije na (slike 9 i 10) ne može se uočiti trend odstupanja rezultata simulacije od laboratorijskih merenja odnosno nema pravilnosti u odstupanju. Razlike rezultata merenja se mogu objasniti time što RDF simulacija koristi modele koji sadrže određene aproksimacije. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da simulacija dobro opisuje situaciju u slučaju verzije V0, kada je oblik otvora kružni, a najlošije u slučaju verzije V2 kada je oblik otvora približno polukružni. U ostalim slučajevima, kada su otvori nepravilni, računarska simulacija predviđa veće padove pritiska. Rezultati ukazuju na to da koeficijenti korišćeni u računarskoj simulaciji za nepravilne oblike otvora nisu adekvatni.



Slika 9. Pad pritiska na mernoj blendi kao elementu cevovoda određen eksperimentalno i RDF simulacijom

Figure 9. Pressure drop of the orifice plate as an element of the pipeline determined experimentally and by CFD simulation



Slika 10. Pad pritiska na mernim mestima neposredno pre i posle merne blende određen eksperimentalno i RDF simulacijom

Figure 10. Pressure drop at the measuring points immediately before and after the orifice plate determined experimentally and by CFD simulation

Takođe se može zaključiti da predloženi efekat povećanja otvora merne blende kroz koji teče fluid, daje već u verziji V1 u odnosu na verziju V0 znatno smanjenje vrednosti  $\Delta\omega$  (slika 9). Između verzija V1 i V2 smanjenje vrednosti  $\Delta\omega$  je znatno manje. Između verzija V2 i V3 razlika vrednosti  $\Delta\omega$  je zanemarljiva. Takođe i vrednost  $\Delta p$  (slika 10) pokazuje znatno smanjenje vrednosti kod verzije V1 u odnosu na V0 dok je to smanjenje između verzija V1 i V2 znatno manje i zanemarljivo između verzija V2 i V3. Stoga se može zaključiti da se veliko smanjenje razlike pritisaka postiže već verzijom V1, odnosno početnim povećanjem otvora merne blende kroz koji teče fluid, ali se ne nastavlja daljim povećanjem dobijenim verzijom V2, a između verzija V2 i V3 praktično je bez efekata. Iz rezultata simulacije se može zaključiti da laboratorijska ispitivanja verzija V2 i V3 nisu potrebna. Međutim, ona su urađena da bi se proverilo slaganje rezultata simulacije sa laboratorijskim rezultatima.

Predloženim oblicima merne blende je postignuto smanjenje  $\Delta\omega$ , što dovodi do uštede energije tokom rada. Međutim, to je dovelo i do pada  $\Delta p$ , što rezultuje padom tačnosti merenja protoka i povećava mogućnost greške merenja. Konstruisanjem merne blende čiji će oblik biti između standardnog V0 i oblika V1 očekuje se postizanje optimuma između željene tačnosti merenja i uštede energije.

#### 4. ZAKLJUČAK

Cilj rada je bio ispitivanje novih oblika mernih blendi radi uštede energije tokom njihovog rada. Predložen je algoritam pomoću kojeg se predloženi novi oblici mernih blendi prvo ispituju pomoću RDF simulacije, a zatim izrađuju pomoću 3D štampe i testiraju u laboratorijskim uslovima. Rezultati eksperimentalnih merenja su prikazani uporedo sa rezultatima RDF simulacije.

Dizajnirana je serija od četiri merne blende, od kojih su tri bile novih oblika a četvrta je služila za poređenje kao referentna. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je znatan efekat uštede energije, u odnosu na referentni oblik (V0), koja se manifestuje smanjenjem  $\Delta\omega$  postignut već kod prvog (V1) od tri predložena nova oblika, dok je kod ostalih efekat uštede energije bio znatno manji.

Rezultati dobijeni laboratorijskim ispitivanjem pokazuju da razlika vrednosti laboratorijski merenja  $\Delta\omega$  pada sa 2005 Pa kod referentnog oblika (V0), na 361 Pa kod V1, što je znatna razlika. Postignute su razlike u vrednosti  $\Delta\omega$  između V1 (361 Pa) i V2 (135 Pa) i između V2 (361 Pa) i V3 (135 Pa) ali u znatno manjoj meri. Razlike vrednosti laboratorijskih merenja  $\Delta p$  prate trend razlika  $\Delta\omega$  što dovodi do pada tačnosti merenja protoka i povećava mogućnost greške merenja.

Na osnovu predstavljenih rezultata može se zaključiti da se predloženi algoritam ispitivanja se pokazao korisnim u dizajniranju novih oblika mernih blendi. Pomoću RDF simulacije se mogu dobiti podaci na osnovu kojih se može doneti odluka da li novi oblik treba korigovati ili se može pristupiti laboratorijskom ispitivanju. Samim tim ovaj algoritam je svakako preporučljivo primeniti prilikom konstruisanja i ispitivanja mernih blendi.

Iako je predloženim oblicima mernih blendi postignuto smanjenje utroška energije, to je dovelo i do pada tačnosti merenja protoka i do povećanja mogućnosti greške merenja. Postizanje optimuma između željene tačnosti merenja i uštede energije treba tražiti konstruisanjem merne blende čiji će oblik biti između referentnog V0 i predloženog V1.

#### LITERATURA

- [1] EN ISO 5167-1: Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full. Part 1: General principles and requirements. 2003.
- [2] EN ISO 5167-2: Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full. Part 2: Orifice plates. 2003.
- [3] Nicolleau FC. Return to axi-symmetry for pipe flows generated after a fractal orifice. *Fluid Dyn. Res.* 2013; 45:061402.
- [4] Gronych T, Jerab M, Peksa L, Wild J, Stanček F, Vičar M. Experimental study of gasflow through a multi-opening orifice. *Vacuum* 2012; 86:1759-1763.
- [5] Montagna F, Schena E, Massaroni C, Caciotti C, Presti DL, Silvestri S. Influence of the length of lead lines on the response of a variable orifice meter: analysis of sensitivity and settling time. In: *IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Rome, 2018, pp. 1-6.
- [6] Qiao M, Wei W, Huang W, Li J, Xue Y, Deng C. Flow patterns and hydrodynamic model for gas-liquid co-current downward flow through an orifice plate. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2019; 100:144-157.
- [7] Rydlewicz W, Rydlewicz M, Palczynski T. Experimental investigation of the influence of an orifice plate on the pressure pulsation amplitude in the pulsating flow in a straight pipe. *Mech. Syst. Signal Process.* 2019; 117:634-652.
- [8] Mubarok MH, Zarrouk SJ, Cater JE. Two-phase flow measurement of geothermal fluid using orifice plate: Field testing and CFD validation, *Renew. Energy* 2019; 134:927-946.
- [9] Krassow H, Campabadal F, Lora-Tamayo E. The smart-orifice meter: a mini head meter for volume flow measurement. *Flow Meas. Instrum.* 1999; 10:109-115.
- [10] Perumal K, Ganesan R. Integration of numerical and physical experiments to enhance student learning experience. *Comput Appl Eng Educ.* 2018; 26:1930-1938.
- [11] Rudolf P, Kubina D, Kozak J, Hudec M, Pochyly F. Dynamics of the Cavitating Flow Downstream of the Orifice Plate. *AIP Conference Proceedings* 2017; 1889 (1):020033 8 pp.
- [12] Mancuso G. Experimental and numerical investigation on performance of a swirling jet reactor. *Ultrason. Sonochem.* 2018; 49:241-248.



- [13] Wang LQ, Ma HH, Shen ZW. Effect of orifice plates on detonation propagation in stoichiometric hydrogen-oxygen mixture. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2018; 99:367-373.
- [14] Xu M Y, Zhang J P, Mi JC, Nathan GJ, Kaltp AM. PIV measurements of turbulent jets issuing from triangular and circular orifice plates. *Sci China-Phys Mech Astron* 2013; 56:1176–1186.
- [15] Kumar P, Wong M, Bing M. A CFD study of low pressure wet gas metering using slotted orifice meters. *Flow Meas. Instrum.* 2011; 22:33–42.
- [16] Moosa M, Hekmat MH. Numerical investigation of turbulence characteristics and upstream disturbance of flow through standard and multi-hole orifice flowmeters. *Flow Meas. Instrum.* 2019; 65:203–218.
- [17] Danesh M, Hassan AM. Estimation of Discharge Coefficient in Orifice Meter by Computational Fluid Dynamics Simulation. In: *International Conference on Pure and Applied Sciences*. Koya University, Iraq, 2018 pp. 154-156.
- [18] Khan Z, Tafreshi R, Franchek M, Grigoriadis K. Numerical evaluation of pressure drop across orifices for different gas-liquid mixtures. In: *Proceedings of the ASME 2018 Dynamic Systems and Control Conference DSCC2018*. Atlanta, Georgia, USA, 2018, DSCC2018-9038, pp V003T30A007; 6 pages
- [19] Singh VK, Tharakan TJ. Numerical simulations for multi-hole orifice flow meter. *Flow Meas. Instrum.* 2015; 45:375-383.
- [20] Tukiman MM, Ghazali MNM, Sadikin A, Nasir NF, Nordin N, Sapit A, Razali MA. CFD simulation of flow through an orifice plate. *Mater. Sci. Eng.* 2017; 243:012036.
- [21] Bramaramba V, Srinivasan S. Calculation of Coefficient of Discharge of Orifice Plate and Flow Nozzle Using CFD Analysis. *IJMETMR.* 2015; 2 (12):31-34.
- [22] Shaaban S. Optimization of orifice meter's energy consumption. *Chem. Eng. Res. Des.* 2014; 92:1005-1015.
- [23] S. Manish Shah, B. Jyeshtharaj Joshi, S. Avtar Kalsi, C.S.R. Prasad, S. Daya Shukla, Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation, *Chem. Eng. Sci.* 71 (2012) 300–309.
- [24] He D, Chen S, Bai B. Experiment and Numerical Simulation on Gas-Liquid Annular Flow through a Cone Sensor. *Sensors.* 2018; 18(9):2923.
- [25] Mubarok, Mohamad & Zarrouk, Sadiq & Cater, John. (). Numerical and analytical modeling of pressure drop through a geothermal two-phase orifice plate. In: *Proceedings 40th New Zealand Geothermal Workshop*, Taupo, New Zealand, 2018.
- [26] Kuzmin D, Mierka O, Turek S. On the implementation of the  $k - \epsilon$  turbulence model in incompressible flowsolvers based on a finite element discretization. *Int. J. Comp. Sci. Math.* 2007; 2/3/4:193–206.

**SUMMARY****Analysis of new forms of orifice plates using computational fluid dynamics**Dragan P. Halas<sup>1</sup>, Oskar J. Bera<sup>2</sup>, Radovan P. Omorjan<sup>2</sup>, Aleksandar A. Rajić<sup>1</sup>, Danijela M. Jašin<sup>1</sup><sup>1</sup>*Technical College of Applied Sciences in Zrenjanin, Đorđa Stratimirovića 23, Zrenjanin, Serbia*<sup>2</sup>*University of Novi Sad, Faculty of Technology Novi Sad, Novi Sad, Serbia*

(Scientific paper)

In many technologies, such as process industry or water supply, there is a need to measure fluid flowrates. Orifice plates are the most common instruments for measuring the fluid flowrate through pipelines due to their many advantages. On the other side, their use increases operating costs of industrial plants and pipelines. In this work, three new forms of orifice plates were designed and tested. These new forms and one standard, which served as a reference, were designed by using the SolidWorks software package. The aim of the new designs was energy savings, and consequently reduction of operating costs. Energy savings can be achieved by such a design, which decreases the orifice plate resistance an element of the pipeline. This was achieved by increasing the open part of the orifice plate permitting the fluid flow. CAD models of orifice plates were transferred to STL files that were further used for CFD simulation as well as 3D printing of experimental replicas. According to the proposed algorithm, the new designs were tested by CFD simulation performed in the COMSOL Multiphysics software package, by using a finite-difference method. Equations used were based on the Reynolds form of Navier-Stokes equations (RANS, Reynolds-averaged Navier-Stokes), and the continuity equation for incompressible fluids. Next, as we have proposed in our algorithm of development of new orifice plate designs, experimental orifice plates were made by using 3D printing technology and FDM (*Fused Deposition Modeling*) procedure and tested at laboratory conditions. The results of laboratory tests were compared with the results of CFD simulation. A considerable amount of energy saving was indicated, which was achieved already by the first of the three new orifice plate forms (V1) as compared to the reference (V0). For the other two proposed forms, the effect of energy savings was considerably lower. By using CFD simulation, data can be obtained based on which a decision can be made whether the new shape of the measuring device should be corrected or is appropriate for further laboratory tests. Based on the presented results it can be concluded that the proposed testing algorithm proved useful in designing new forms of orifice plates.

*Keywords:* flow measurement; computer simulation; fluid flow; energy saving; 3D printing