

Ivan Filipović, Boran Pikula, Dževad Bibić, Goran Kepnik

ISSN 0350-350X

GOMABN 53, 2, 139-152

Izvorni znanstveni rad / Original scientific paper

UTJECAJ OSOBINA GORIVA NA TRANSFORMACIJU ENERGIJE U SUSTAVU UBRIZGAVANJA KOD DIZELOVOG MOTORA

Sažetak

Uporaba alternativnih goriva za pogon cestovnih vozila postaje sve rasprostranjenija u svim vidovima transporta od javnog prijevoza putnika, taksi vozila, do lakih dostavnih vozila namijenjenih za kretanje u urbanim sredinama. Pri tome se mora reći da najveću primjenu imaju ona alternativna goriva koja ne zahtijevaju konstrukcijske izmjene na motorima (posebno dizelovim motorima). Međutim, pri tome se mora voditi računa o izlaznim karakteristikama sustava za ubrizgavanje pri uporabi različitih goriva. Karakteristike ubrizgavanja (tlak i brzina goriva na izlazu iz otvora brizgaljke) kod dizelovih motora, zavise od karakterističnih parametara sustava ubrizgavanja i osobina goriva. Najvažniji karakteristični parametri sustava ubrizgavanja su obujam u sustavu ubrizgavanja, rastojanje između mjesta potiskivanja i mjesta ubrizgavanja goriva, mase pokretnih dijelova u sustavu ubrizgavanja, protočni presjeci u sustavu ubrizgavanja i karakteristike refleksije valova tlaka i brzine. Da bi se poboljšale karakteristike ubrizgavanja najveća pažnja se poklanja minimiziranju obujma u sustavu ubrizgavanja, posebno u brizgaljci. Na ovaj način dolazi do bržeg porasta tlaka (dp/dt), manjeg generiranja reflektiranih valova tlaka goriva i kvalitetnijih karakteristika ubrizgavanja, posebno na niskim režimima opterećenja (male količine ubrizganog goriva). S druge strane, smanjenje volumena u sustavu ubrizgavanja ima posljedicu smanjenja dimenzija (posebno protočnih kanala). Ovim se direktno utječe na transformaciju potencijalne energije goriva (izražene u vidu tlaka goriva) u kinetičku energiju goriva (izraženu u vidu brzine toka goriva). Svaka promjena potencijalne u kinetičku energiju u sustavu ubrizgavanja ima posljedicu porasta hidrauličkih gubitaka i pogoršanja karakteristika ubrizgavanja goriva.

U kontekstu prethodno iznesenih činjenica, u radu je prikazana detaljna analiza transformacije potencijalne energije u kinetičku energiju goriva u slučaju uporabe različitih vrsti goriva (dizelsko gorivo, biodizelsko gorivo). Posebna pozornost će se posvetiti brizgaljci, gdje se odvija najveća transformacija energije, čega je posljedica i stvaranje najvećih gubitaka u sustavu ubrizgavanja.

Ključne riječi: dizelsko gorivo, biodizelsko gorivo, energetski gubici, dizelov motor, sustav ubrizgavanja

1. Uvod

Energetska efikasnost motora s unutarnjim izgaranjem (sui) ovisi o pripremi smjese goriva i zraka i samog procesa izgaranja. Na proces pripreme smjese goriva i zraka utječu [1-5]: tlak ubrizgavanja goriva, karakteristike mlaza goriva, početak, trajanje i oblik karakteristike ubrizgavanja, ekvivalentni odnos zraka i goriva, intezitet i forma zračnog vrtloga u prostoru izgaranja i stanje zraka (tlak i temperatura) u cilindru motora tokom ubrizgavanja.

Svi nabrojani parametri, gledano prostorno i vremenski, zavise od brzinskog režima i režima opterećenja motora. Gledajući pojednostavljeno, dva ključna elementa u procesu formiranja radne mješavine su:

- energija unesena gorivom i
- energija unesena zrakom.

Odnos ovih energija ovisi o vrsti dizelovog motora. Kod dizelovih motora velikog obujma, dominantnu ulogu na proces formiranja radne mješavine ima energija unesena gorivom. U konkretnom slučaju, gdje se radi o srednje brzohodnim motorima za teretna vozila, dominantan utjecaj ima energija goriva, koja se može izraziti u obliku kinetičke energije mlaza goriva. Svako povećanje energije goriva u sustavu ubrizgavanja, posebno kod konvencionalnih sustava ubrizgavanja goriva, povezano je s konstrukcijskim karakteristikama samog sustava [3, 4] i fizikalnim osobinama goriva [3, 7]. Uloga različitih fizikalnih osobina goriva je prisutna kroz primjenu različitih alternativnih goriva samostalno ili kao mješavina s dizelskim gorivom. Energetska razina goriva na izlazu iz brizgaljke može se definirati parametrima [6]:

- kompresibilnost goriva ($\frac{V}{E} \cdot \frac{dp}{dt}$),
- zakašnjenje ubrizgavanja (l/a),
- inertnost pojedinih elemenata ($m\ddot{x}$),
- sila u elastičnim elementima (cx),
- prigušenje pojedinih procijepa ($\mu A \sqrt{2\Delta p / \rho}$) i
- povratne sprege (karakteristika refleksije).

U nabrojenim parametrima prepoznatljive su istovremeno i konstruktivne karakteristike sustava ubrizgavanja i fizikalne osobine goriva. Istraživanje transformacije energije goriva u sustavima za ubrizgavanje dizelskog goriva do sada se obrađivalo eksperimentalnim putem samo u završnom dijelu ubrizgača, putem uvećanih modela ubrizgača [6]. U literaturi se do sada nisu pojavljivali radovi koji analiziraju transformaciju energije goriva u cijelom sustavu ubrizgavanja zbog veoma složenih eksperimenata, kao i zbog nemogućnosti simuliranja strujanja goriva za cio sustav u 3D modelima. Za cjelovitu analizu transformacije energije goriva jedini realan put je numerička simulacija pomoću 0D-1D modela.

U tom kontekstu autori su kroz nekoliko vlastitih istraživanja prikazanih u [3, 4, 5, 7, 12] razvili i usavršili vlastite 0D-1D modele za simuliranje strujanja goriva duž sustava ubrizgavanja čime su stečeni uvjeti za definiranje transformacije energije goriva u svakoj pojedinačnoj točki sustava ubrizgavanja. Posebna, specifična rješenja su rađena za ubrizgač, gdje je i najvažnija transformacija energije goriva.

Za konkretan slučaj sustava ubrizgavanja (poznate konstruktivne karakteristike sustava ubrizgavanja) napravljena je analiza utjecaja osobina goriva na:

- razinu potencijalne i kinetičke energije goriva u sustavu ubrizgavanja;
- transformaciju potencijalne u kinetičku energiju, s posebnim osvrtom na brizgaljku;
- razinu kinetičke energije na izlazu goriva iz brizgaljke i
- razinu energetske gubitaka duž sustava ubrizgavanja.

2. Objekt i metoda istraživanja

Istraživanje je provedeno na tzv. konvencionalnom sustavu ubrizgavanja goriva pumpa-cijev-brizgaljka, gdje je pumpa visokog tlaka proizvođača BOSCH, tip PES 6A 95D 410 LS 2542, regulator broja obrtaja BOSCH, tip RQ 250/1100 AB 1137-4, cijev visokog tlaka unutarnjeg promjera Φ 1,8 mm, dužine 1430 mm, nosač brizgaljke BOSCH tip KDAL 80S20/129 i brizgaljka D2L 25S834. U istraživanju je korišten vlastito razvijen računarski program za simuliranje parametara sustava za ubrizgavanje goriva, s eksperimentalnom verifikacijom karakterističnih rezultata.

2.1. Model za simuliranje rada sustava za ubrizgavanje goriva

U radu je korišten fizikalni model sustava za ubrizgavanje goriva prikazan na slici 1, temeljen na konceptu nuldimezionalnog-jednodimezionalnog modeliranja, koji je detaljno opisan u [3, 5, 11, 12]. Osnovne jednadžbe koje se koriste u matematičkom modelu sustava ubrizgavanja prikazanog na slici 1 su:

a) za cijev promjenjivog poprečnog presjeka:

- jednadžba kontinuiteta:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + a^2 \rho \frac{\partial w}{\partial z} \pm \frac{2a^2 \rho w \lambda}{d_c} = 0 \quad (1)$$

- jednadžba količine kretanja:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\lambda w |w|}{2d_c} = 0 \quad (2)$$

dok su za cijev konstantnog poprečnog presjeka prethodne jednadžbe modificirane i dane u literaturi [7].

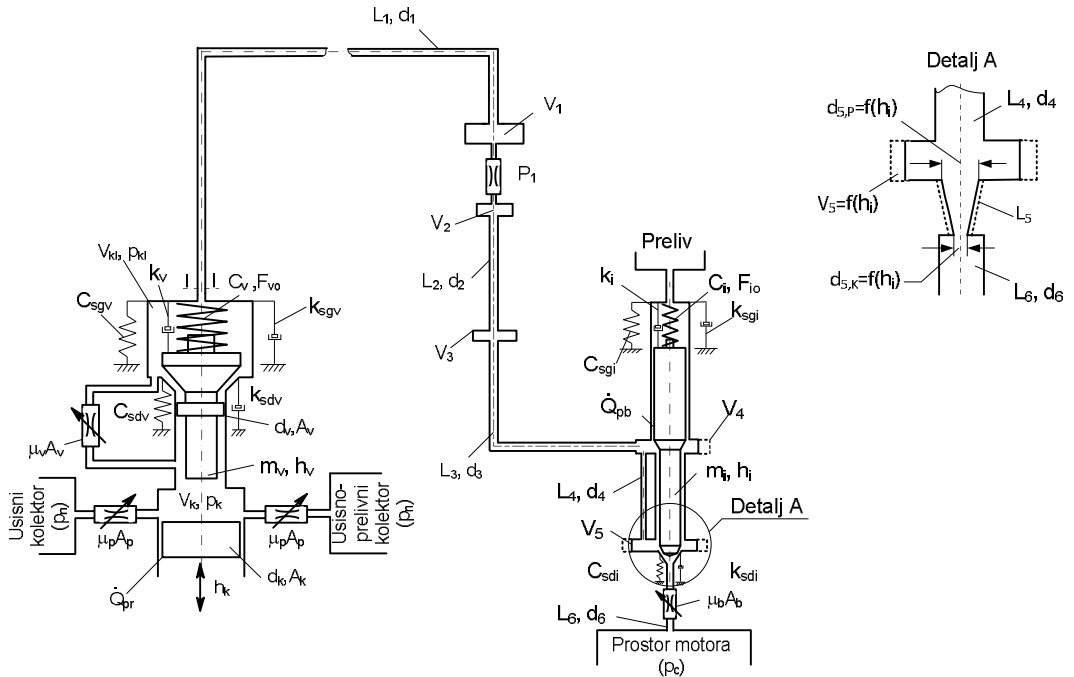
b) Za volumene je korištena jednadžba kontinuiteta u integralnom obliku (tzv. nuldimezijski model):

$$\frac{V_j}{E} \frac{dp}{dt} = \sum_{m=1}^n \dot{V}_m \quad (3)$$

c) Za kretanje pokretnih dijelova u sustavu ubrizgavanja korišten je drugi Newtonov zakon u obliku:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} + k \frac{dh}{dt} + Ch = \sum F \quad (4)$$

Jednadžbe (1) i (2) su numerički rješavane metodom karakteristika, dok su jednadžbe (3) i (4), uz uvjet prevođenja jednadžbe (4), koja je po svom karakteru nehomogena linearna diferencijalna jednadžba drugog reda, u dvije nehomogene linearne diferencijalne jednadžbe prvog reda, rješavane u računskom programu metodom Runge-Kutta 4. reda s promjenjivim korakom. Svi hidraulički gubici lokalnog i linijskog karaktera u sustavu ubrizgavanja uzeti su iz literature [8-10].



Slika 1: Fizikalni model konvencionalnog sustava ubrizgavanja goriva

Tablica 1: Osnovni podaci o sustavu ubrizgavanja

Pumpa visokog tlaka	
Promjer klipa	$d_k = 9,5 \text{ mm}$
Hod klipa	$h_k = 8,0 \text{ mm}$
Početni volumen iznad klipa pumpe visokog tlaka	$V_k = 278,0 \text{ mm}^3$
Rasteretni ventil pumpe visokog tlaka	
Promjer rasteretnog ventila	$d_v = 6,0 \text{ mm}$
Hod rasteretnog ventila	$h_v = 4,3 \text{ mm}$
Početni volumen iznad rasteretnog ventila	$V_k = 836,6 \text{ mm}^3$
Cijev visokog tlaka	
Promjer cijevi visokog tlaka	$d_1 = 1,8 \text{ mm}$
Duljina cijevi visokog tlaka	$L_1 = 1024,5 \text{ mm}$
Volumen ispred štap-filtera	$V_1 = 98,1 \text{ mm}^3$
Volumen poslije štap-filtera	$V_2 = 29,3 \text{ mm}^3$
Cijev u nosaču brizgaljke	
Promjer cijevi u nosaču brizgaljke	$d_2 = 2 \text{ mm}$
Duljina cijevi u nosaču brizgaljke	$L_2 = 65 \text{ mm}$
Prstenasti volumen u tijelu brizgaljke	$V_3 = 139 \text{ mm}^3$
Cijev u tijelu brizgaljke	
Promjer cijevi u tijelu brizgaljke	$d_3 = 2 \text{ mm}$
Duljina cijevi u tijelu brizgaljke	$L_3 = 21,63 \text{ mm}$
Prstenasti volumen oko igle brizgaljke	$V_4 = V_4(h_i)$
Početna vrijednost volumena oko igle brizgaljke	$V_{4,0} = 79,6 \text{ mm}^3$
Cijev oko igle brizgaljke	
Promjer cijevi oko igle brizgaljke	$d_4 = 2,18 \text{ mm}$
Duljina cijevi oko igle brizgaljke	$L_4 = 22 \text{ mm}$
Konus sjedišta igle brizgaljke	
Površina poprečnog presjeka na početku konusa sjedišta	$A_{5P} = f_1(h_i) = 4,598 h_i$
Površina poprečnog presjeka na kraju konusa sjedišta	$A_{5K} = f_2(h_i) = 2,5 h_i + 0,1226$
Duljina konusa	$L_5 = 2 \text{ mm}$
Volumen SAC	$V_{SAC} = f(h_i) =$ $1,558 h_i^2 + 1,986 h_i + 0,3833$
Mlaznica	
Promjer mlaznice	$d_6 = 0,68 \text{ mm}$
Duljina mlaznice	$L_6 = 2 \text{ mm}$
Masa pokretnih dijelova rasteretnog ventila	$m_v = 2,6884 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$
Masa pokretnih dijelova brizgaljke (igla + sjedište opruge + opruga)	$m_i = 14,7566 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$

Igla brizgaljke	
Maksimalna vrijednost hoda igle brizgaljke	$h_{max} = 0,3 \text{ mm}$
Promjer igle brizgaljke na gornjem sjedištu	$d_{11} = 6 \text{ mm}$
Promjer igle brizgaljke na donjem sjedištu	$d_{13} = 4,5 \text{ mm}$
Promjer sjedišta igle brizgaljke	$d_{14} = 3,03 \text{ mm}$
Promjer konusa na vrhu igle brizgaljke	$d_{15} = 1,54 \text{ mm}$
Opruga igle brizgaljke	
Sila predstlačivanja opruge brizgaljke	$F_{i0} = 362 \text{ N}$
Krutost opruge igle brizgaljke	$C_i = 183,8 \text{ N/mm}$
Sjedišta igle brizgaljke	
Krutost donjeg sjedišta igle brizgaljke	$C_{sdi} = 10^5 \text{ N/mm}$
Krutost gornjeg sjedišta igle brizgaljke	$C_{sgj} = 10^5 \text{ N/mm}$
Koeficijent prigušenja (otpor kretanja) igle brizgaljke na donjem sjedištu	$k_{sdi} = 300 \text{ N/(m/s)}$
Koeficijent prigušenja (otpor kretanja) igle brizgaljke na gornjem sjedištu	$k_{sgj} = 300 \text{ N/(m/s)}$

2.2. Uvjeti istraživanja i fizikalna svojstva goriva

U sklopu istraživanja korištena su dva goriva i to:

- dizelsko gorivo gustoće $\rho = 812 \text{ kg/m}^3$ na temperaturi goriva od $36 \text{ }^\circ\text{C}$ i
- biodizelsko gorivo gustoće $\rho = 862 \text{ kg/m}^3$ na temperaturi od $36 \text{ }^\circ\text{C}$,

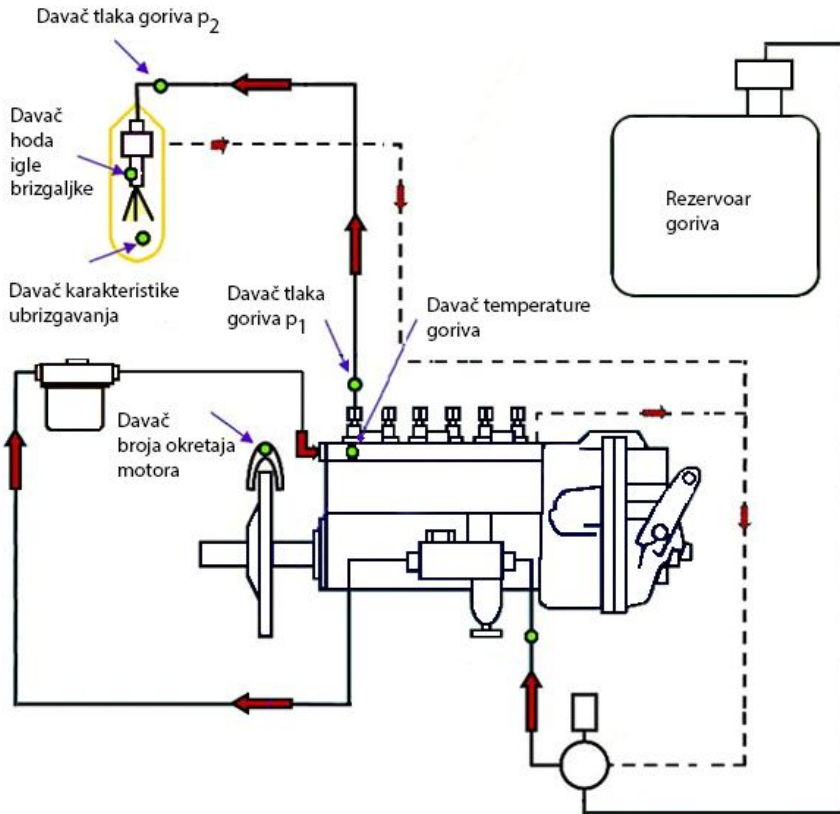
pri tlaku goriva $p = 1 \text{ bar}$.

Temperatura goriva u sustavu ubrizgavanja je realno $35\div 38 \text{ }^\circ\text{C}$ i za konkretan rad je usvojena temperatura od $36 \text{ }^\circ\text{C}$. Fizikalne osobine goriva, neophodne za simulaciju procesa u sustava ubrizgavanja, u funkciji tlaka u sustavu ubrizgavanja i to: gustoća goriva (ρ), brzina prostiranja zvuka kroz gorivo (a), modul elastičnosti goriva (E) i kinematička viskoznost (ν) dani su prema korelacijskim izrazima definiranim u [2, 3, 7, 11]. Istraživanje je provedeno u uvjetima: (a) konstantnog geometrijskog hoda potiskivanja pumpe visokog tlaka za obje vrste goriva ($h_{kg} = \text{const.}$), (b) konstantno unesene količine topline gorivom po ciklusu i cilindru za obje vrste goriva ($\dot{Q}_{fc} = \text{const.}$). Broj okretaja sustava za ubrizgavanje je iznosio 1100 min^{-1} (ekvivalent broj okretaja dizelovog motora pri maksimalnoj snazi).

2.3. Verifikacija rezultata matematičkog modela

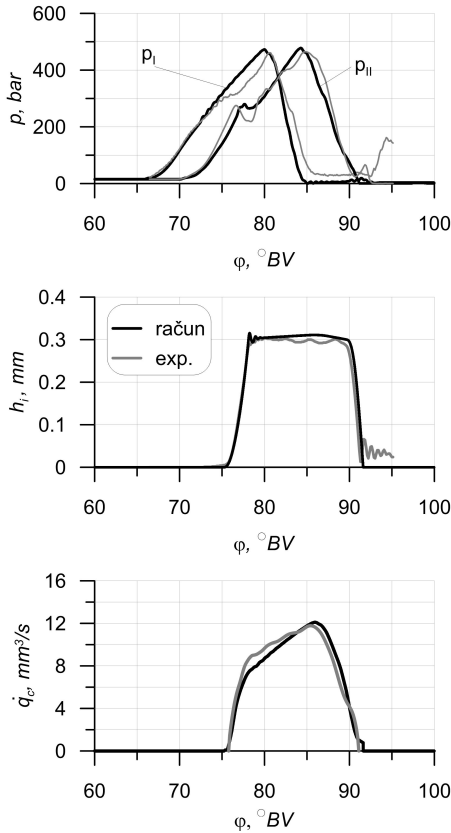
Za svaku ozbiljniju analizu, odnosno istraživanje karakteristika sustava za ubrizgavanje goriva računskim putem, potrebno je izvršiti verifikaciju računskih rezultata pomoću rezultata dobivenih eksperimentalnim putem. Eksperimentalno ispitivanje karakterističnih veličina sustava za ubrizgavanje izvršeno je na probnom stolu tipa 12H 100h, proizvođača Friedmann & Maier, prema mjernoj shemi danoj na slici 2. Na probnom stolu su mjerene veličine: tlak goriva na karakterističnim mjestima, hod igle brizgaljke, karakteristika ubrizgavanja, ciklusna dobava i temperatura goriva u niskotlačnoj magistrali. Oprema za mjerenje ovih veličina i metode mjerenja su detaljno opisane u [3, 11].

Za usvojeni brzinski režim rada pumpe visokog tlaka ($n = 1100 \text{ min}^{-1}$) uzeta je ciklusna dobava za dizelsko gorivo $q_{c,D2} = 132 \text{ mm}^3/\text{cikl.cil.}$, a za biodizelsko gorivo (dano u točki 2.2.) u ovim eksperimentima zadržan je princip $h_{kg} = \text{const}$. Dobiveni rezultati eksperimentalnim putem su uspoređeni s odgovarajućim računskim rezultatima za oba goriva, što je prikazano na slikama 3 i 4.

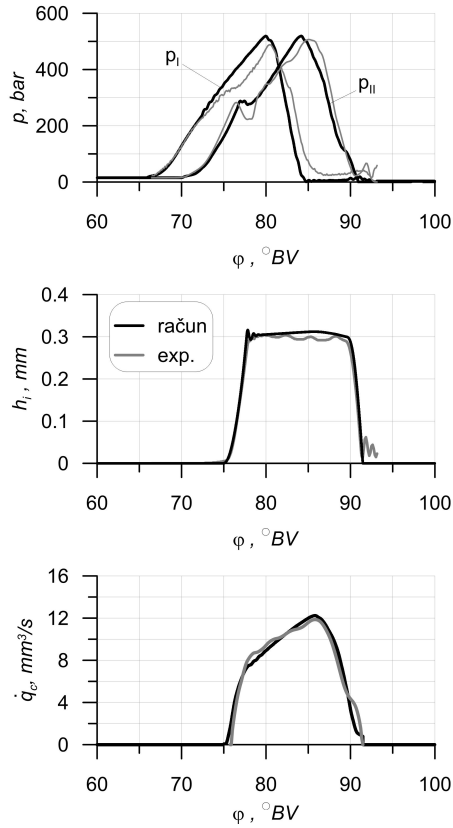


Slika 2. Shema mjerne linije za ispitivanje karakteristika sustava ubrizgavanja

Razlike između eksperimentalnih i računskih rezultata, što je prikazano na slikama 3 i 4, su u domeni dopuštene pogreške, čime se može smatrati da razvijeni računarski program za proračun parametara sustava za ubrizgavanje daje zadovoljavajuće rezultate. Daljnja istraživanja u ovom radu, zahvaljujući prethodnoj konstataciji su učinjena uz pomoć računarskog programa za simuliranje parametara sustava ubrizgavanja.



Slika 3. Usporedni rezultati tlaka goriva, hoda igle brizgaljke i karakteristike ubrizgavanja za dizelsko gorivo ($\rho = 812 \text{ kg/m}^3$)

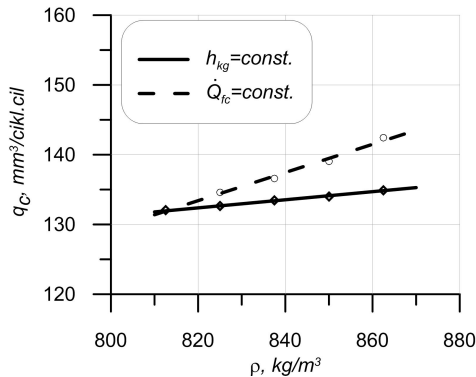


Slika 4. Usporedni rezultati tlaka goriva, hoda igle brizgaljke i karakteristike ubrizgavanja za biodizelsko gorivo ($\rho = 862 \text{ kg/m}^3$)

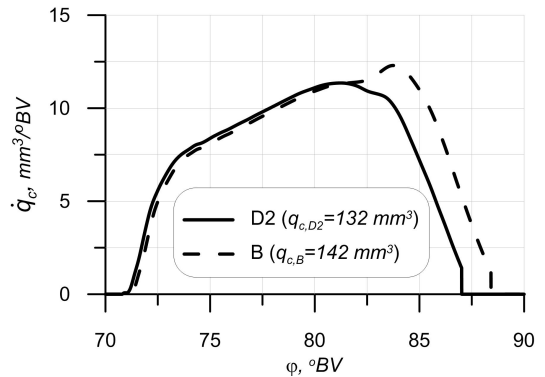
3. Analiza rezultata istraživanja

Istraživanje utjecaja osobina goriva na transformaciju energije u sustavu ubrizgavanja trebalo bi se provesti za uvjete: $h_{kg} = \text{const.}$ i $\dot{Q}_{fc} = \text{const.}$ S obzirom na različite toplotne moći dizelskog goriva $Q_{d,D2} = 42,6 \text{ MJ/kg}$ i biodizelskog goriva $Q_{d,D2} = 37,3 \text{ MJ/kg}$ uz uvjet $\dot{Q}_{fc} = \text{const.}$ doći će kod biodizelskog goriva do značajnijeg povećanja ciklusne dobave goriva (q_c). Dijagram promjene ciklusne dobave goriva (q_c) u funkciji gustoće goriva, uz uvjet $\dot{Q}_{fc} = \text{const.}$, dan je na slici 5. Na toj slici dan je i dijagram promjene ciklusne dobave pri $h_{kg} = \text{const.}$

Imajući u vidu da je za slučaj $\dot{Q}_{fc} = const.$ porast ciklusne dobave kod biodizelskog goriva u odnosu na dizelsko gorivo (oko 9 %), daleko veći nego za slučaj $h_{kg} = const.$, sva daljnja istraživanja bit će obavljena za slučaj $\dot{Q}_{fc} = const.$, jer je realno u ovom slučaju očekivati povećanje otpora strujanja goriva. Karakteristike ubrizgavanja kao i ciklusna dobava goriva za ovaj slučaj ($\dot{Q}_{fc} = const.$) prikazane su usporedno za dizelsko i biodizelsko gorivo na slici 6.



Slika 5. Dijagram promjene ciklusne dobave u funkciji gustoće goriva za slučaj $h_{kg} = const.$ i $\dot{Q}_{fc} = const.$

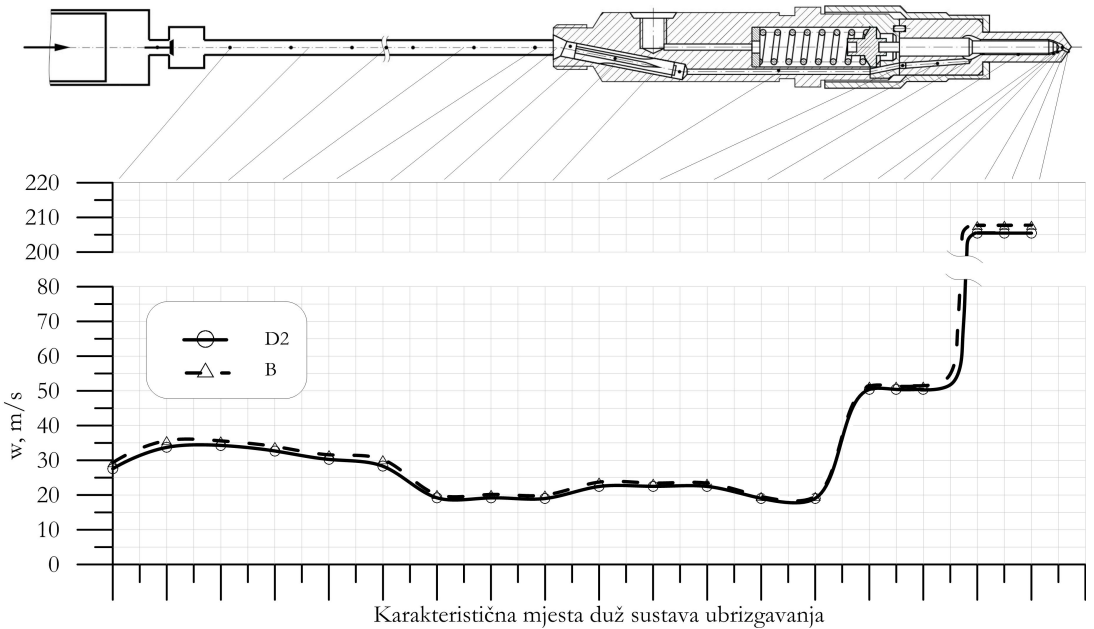


Slika 6. Karakteristike ubrizgavanja za dizelsko i biodizelsko gorivo pri $\dot{Q}_{fc} = const.$

Jedan od najvažnijih parametara u procesu transformacije energije i stvaranja energetske gubitaka u sustavu ubrizgavanja je brzina strujanja goriva duž sustava. Način prikazivanja promjene brzine strujanja goriva duž sustava ubrizgavanja je vrlo osjetljiv, s obzirom na dinamičke procese koji se javljaju u sustavu, gdje se brzina, pored mjesta promatranja, mora promatrati i s promjenom vremena. U svakom slučaju, da bi se bolje shvatio karakter promjene brzine strujanja goriva u sustavu ubrizgavanja, najprihvatljivije je promatrati brzinu goriva na izlazu iz pumpe visokog tlaka, odnosno rasteretnog ventila (presjek I-I, slika 1) i pratiti njenu promjenu duž sustava ubrizgavanja čiji signal se prostire brzinom zvuka (a) kroz gorivo. Jedan takav primjer promjene brzine goriva duž sustava za ubrizgavanje prikazan je na slici 7, usporedno za dvije vrste goriva (uz uvijet $\dot{Q}_{fc} = const.$).

Dobiveni rezultati pokazuju sigurno, ali vrlo malo, povećanje brzine strujanja biodizelskog goriva u odnosu na dizelsko gorivo. Ovdje je interesantniji tok brzine strujanja duž sustava ubrizgavanja gdje se brzina strujanja od 20 ÷ 30 m/s u cijevi i većem dijelu brizgaljke penje na vrijednost od preko 200 m/s u završnom dijelu brizgaljke.

Ovo upućuje na zaključak da se suštinski najveća transformacija potencijalne u kinetičku energiju goriva odvija u završnom dijelu brizgaljke, gdje se generiraju i najveći gubici.



Slika 7: Usporedni dijagram promjene brzine strujanja goriva duž sustava ubrizgavanja u slučaju uporabe dizelsko i biodizelsko gorivo ($\dot{Q}_{fc} = const.$)

Dijagram transformacije energije duž sustava ubrizgavanja dan je u relativnim vrijednostima procentualno u odnosu na totalnu energiju, što je prikazano na sl. 8a. Totalna energija je uzeta na početku cijevi visokog tlaka (presjek I-I, slika 1) izražena kao 100 % energije u vidu totalnog tlaka p_{I-I} gdje nema gubitaka.

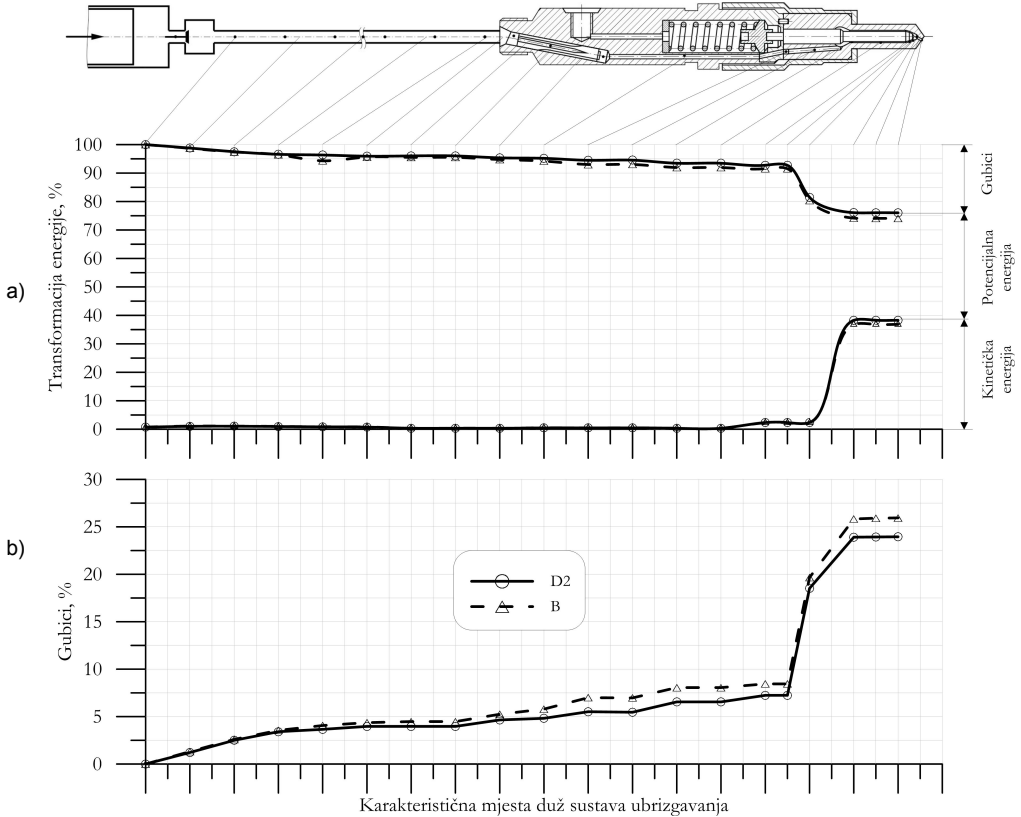
Propagacija signala brzine (w) i tlaka goriva (p) duž sustava ubrizgavanja brzinom zvuka (a) kroz gorivo omogućava da se na proizvoljnom mjestu sustava ubrizgavanja (točka k) odrede veličine kinetičke i potencijalne energije i energije gubitaka izražene u vidu odgovarajućih tlakova, u obliku:

$$p_{I-I} = p_{pe} + p_{ke} + p_{eg} = p_{pe,k} + \frac{\rho_f w_k^2}{2} + \sum_i^k \xi_i \frac{\rho_f w_k^2}{2} + \sum_j^k \lambda_j \frac{L_j}{d_j} \frac{\rho_f w_j^2}{2} \quad (5)$$

Dijeljenjem izraza (5) sa p_{I-I} i množenjem sa 100 dobiva se odnos:

$$100\% = e_{pe} + e_{ke} + e_{eg} \quad (6)$$

gdje se sa e označava relativna vrijednost potencijalne energije (e_{pe}), kinetičke energije (e_{ke}) i energije gubitaka (e_{eg}) izražena u postocima.



Slika 8: Usporedni dijagram transformacije energije duž sustava ubrizgavanja a) i dijagram gubitaka, b) duž istog sustava za dizelsko i biodizelsko gorivo

Prema slici 8 a) vidi se da je relativna transformacija energije u sustavu ubrizgavanja vrlo slična za oba goriva. Ako se pogleda detalj energije gubitaka izražen u % od ukupne energije na početku sustava ubrizgavanja (presjek I-I, slika 1), koji je prikazan na slici 8b) može se zaključiti da su gubici u sustavu ubrizgavanja veći za 2÷3 % relativno ako se koristi biodizelsko gorivo u odnosu na gubitke kod dizelskog goriva. Ovakav porast gubitaka, pri korištenju biodizelskog goriva u odnosu na dizelsko gorivo, nema nekog posebnog značaja. Ovdje je daleko važnije spomenuti tok transformacije energije u završnom dijelu brizgaljke, gdje je ona i najintenzivnija i gdje se suštinski stvaraju i najveći gubici. U procesu oblikovanja završnog dijela brizgaljke, gdje je i najveća transformacija potencijalne energije u kinetičku, osnovni cilj konstruktora brizgaljke je da se dovede sva energija u formi potencijalne energije i da se na samom kraju (izlazni otvori brizgaljke) ona pretvori u kinetičku energiju čime se postižu dva ključna cilja: smanjenje gubitaka u sustavu ubrizgavanja i poboljšanje uvjeta za kvalitetnije raspršivanje goriva.

4. Zaključak

Zahvaljujući vlastito razvijenom fizikalnom modelu i odgovarajućem računarskom programu za simuliranje strujanja goriva duž sustava za ubrizgavanje goriva kod dizelskih motora omogućeno je definiranje energetskeg potencijala goriva u obliku kinetičke i potencijalne energije na svakoj lokaciji sustava za ubrizgavanje.

Na osnovi analize rezultata istraživanja može se zaključiti:

- hidrodinamičke karakteristike sustava za ubrizgavanje za dizelsko i biodizelsko gorivo se razlikuju vrlo malo, kako za slučaj $h_{kg} = const.$, tako i za slučaj $\dot{Q}_{fc} = const.$,
- najznačajnije povećanje brzine kretanja goriva u sustavu ubrizgavanja je u završnom dijelu brizgaljke, i kod uporabe dizelskog goriva i kod uporabe biodizelskog goriva,
- gubici u sustavu ubrizgavanja su neznatno veći pri uporabi biodizelskog goriva u sustavu ubrizgavanja u odnosu na gubitke pri uporabi dizelskog goriva. Promjena ovih gubitaka, s promjenom goriva, nema nikakvog značaja na pretvorbu energije u sustavu ubrizgavanja.
- za dizelsko i biodizelsko gorivo, najveća transformacija potencijalne energije u kinetičku je u završnom dijelu brizgaljke, gdje se generiraju i najveći gubici, koji se negativno odražavaju na karakteristike raspršivanja goriva.

Literatura

1. Tat M., Van Gerpen J.: Physical Properties and Composition Detection of Biodiesel-diesel Fuel Blends, ASAE Meeting Presentation, Chicago, Illinois, USA, July 2002.
2. Kegl B., Škerget L., Hribernik A., Pogorevc P., Volmajer M., Kokalj F., Pagon A., Polanič A.: Fuel properties, report (Project Mobilis – Civitas II, TREN/04/FP6EN/SO7. 37886/513562), Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, 2006.
3. Filipović I., Pikula B., Kepnik G., Prelčec D.: Influence of physical characteristics of bio fuels on energy losses in fuel injection systems by motor vehicles - The final report - Uticaj fizikalnih osobina biogoriva na energetske gubitke u sistemu ubrizgavanja kod cestovnih vozila - završni izvještaj, Project supported by FMON, No. 05-39-5613-3/11), Mechanical Engineering Faculty, University of Sarajevo, Sarajevo, 2012.
4. Filipović I., Pikula B., Bibić Dž.: Influence of Injection on Characteristics of Fuel Dispersion in Diesel Engine, Fuel and Lubrication, 3/2011, pp 215-232, 2011.
5. Filipović I., Bibić Dž., Pikula B.: Fuel Injection Systems at Diesel Engines, Faculty of Mechanical Engineering, University of Sarajevo, Sarajevo, 2010.
6. Černej A., Dobovišek Ž., Filipović I., Gebert K., Mikluš I., Pagon A.: High pressure fuel injection - script - Visokotlačno ubrizgavanje goriva – skripta, Mechanical Engineering Faculty, University of Maribor, 1986.

7. Filipović I., Pikula B., Bibić Dž.: Influence of Geometric and Hydro-dynamic parameters of Injector on Calculation of Spray Characteristics of Diesel Engine, Thermal Science, 2011, Vol. 15, No. 4, pp 1095-1109, 2011.
8. White F.: Fluid Mechanics, 5th edition, Mc Graw-Hill, New York, 2003.
9. Franzini J., Finnemore J.: Fluid mechanics with engineering applications, 9th edition, Mc Graw-Hill, 1997.
10. Streeter, V.L., Wylie, E.B., Fluid Mechanics, 8th edition, McGraw-Hill, New York, 1985.
11. Pikula B.: Investigation of Characteristics of Fuel Injection System by Use of Diesel, Biodiesel and its Blends in Different Exploitation Conditions - Istraživanje karakteristika sistema za ubrizgavanje goriva pri upotrebi dizelskog, biodizelskog i njihovih mješavina u različitim eksploatacionim uslovima (Bosnian language), Ph.D. Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, University of Sarajevo, Sarajevo, 2007.
12. Filipović I., Pikula B., Kepnik G.: Impact of physical properties of mixture of diesel and biodiesel fuels on hydrodynamic characteristics of fuel injection system, Paper ready for publishing in Thermal Science, 2013.

Korištene oznake:

$A [m^2]$	<i>Površina protočnog presjeka</i>
$a [m/s]$	<i>Brzina prostiranja zvuka kroz gorivo</i>
$C [N/m]$	<i>Krutost</i>
$d [m]$	<i>Promjer cijevi</i>
$E [N/m^2]$	<i>Modul elastičnosti</i>
$e [‰]$	<i>Relativna energija</i>
$F [N]$	<i>Sila</i>
$h [m]$	<i>Hod</i>
$L [m]$	<i>Duljina cijevi</i>
$K [-]$	<i>Konstanta</i>
$k [Ns/m]$	<i>Koeficijent prigušenja</i>
$m [kg]$	<i>Masa</i>
$n [min^{-1}]$	<i>Broj okretaja</i>
$p [bar]$	<i>Tlak</i>
$\dot{V} [m^3/s]$	<i>Protok</i>
$\dot{Q}_{fc} [MJ/cikl.cil.]$	<i>Toplina dovedena gorivom po ciklusu i cilindru</i>
$\dot{q}_c [mm^3/s]$	<i>Karakteristika ubrizgavanja</i>
$q_c [mm^3]$	<i>Ciklusna dobava</i>
$t [s]$	<i>Vrijeme</i>
$V [m^3]$	<i>Volumen</i>
$x [-]$	<i>Podužna koordinata kretanja pokretnih dijelova u sustavu ubrizgavanja</i>
$w [m/s]$	<i>Brzina strujanja goriva</i>

z [m]	Podužna koordinata duž cijevi visokog pritiska
	<u>Grčka slova</u>
Δp [bar]	Pad tlaka goriva kroz brizgaljku
φ [°BV]	Kut bregastog vratila pumpe visokog tlaka
λ [-]	Koeficijent linijskih gubitaka
μ [-]	Koeficijent proticanja
ν [mm ³ /s]	Kinematička viskoznost
ρ [kg/m ³]	Gustoća goriva
ξ [-]	Koeficijent gubitaka
	<u>Indeksi</u>
D2	Dizelsko gorivo
B	Biodizel
b	Brizgaljka
eg	Energija gubitaka
i	Igla brizgaljke
k	Klip
ke	Kinetička energija
kv	Rasteretni ventil
p	Prelivni otvor
pe	Potencijalna energija
sd	Donje sjedište
sg	Gornje sjedište
sui	S unutarnjim izgaranjem
v	Ventil

Autori

Ivan Filipović, Boran Pikula, Dževad Bibić, Goran Kepnik,
 Mašinski fakultet Sveučilišta u Sarajevu, Odsjek za motore i vozila
 e-adrese: filipovic@mef.unsa.ba; pikula@mef.unsa.ba; bibic@mef.unsa.ba;
 kepnik@mef.unsa.ba

Primljeno

23.9.2013.

Prihvaćeno

24.2.2014.