

Stisljivost hidravličnega olja in vpliv zraka

Darko LOVREC, Vito TIČ

Izvleček: Stisljivost hidravlične tekočine je brez dvoma ena od njenih pomembnejših snovnih lastnosti, saj v veliki meri vpliva na togost hidravličnega pogona. V primerjavi z vodo imajo hidravlična mineralna olja dokaj nizek modul stisljivosti, kar povzroča določene nezaželene pojave pri delovanju hidravličnega sistema, še posebej v primerih, ko je zaželen visoka togost pogonov. Razen sprememb obremenitve tekočine s spremembo tlaka in spremembami temperature na stisljivost izredno vplivata delež zraka v obliki zračnih mehurčkov in tudi viskoznost uporabljenega olja.

V prispevku sta v uvodu na kratko predstavljena pomen stisljivosti hidravlične tekočine in podano teoretično ozadje določanja stisljivosti tekočine ob upoštevanju najpomembnejših vplivih faktorjev. V nadaljevanju prispevka pa so ti vplivi prikazani na osnovi eksperimentalnih rezultatov, pri čemer je dovršen del obravnave problematike namenjen napravi za merjenje stisljivosti in vplivu različnega deleža zraka.

Ključne besede: hidravlično olje, stisljivost, meritev stisljivosti, zrak v hidravličnem olju

■ 1 Stisljivost tekočine in togost hidravličnega sistema

Kakor hitro nas pot zanese izven področja obravnave hidravličnega sistema kot idealnega sistema, ki deluje po Pascalovih principih hidrostatike in predpostavlja uporabo idealne tekočine, je dejanske snovne lastnosti hidravlične tekočine vsekakor treba upoštevati.

V idealnih sistemih je predpostavljena uporaba idealne tekočine, ki nima mase, ni podvržena trenju, ni stisljiva. Ker nima mase, za pospeševanje in zaviranje volumna takšne tekočine ni potrebna nikakršna dodatna energija. Ker ni viskozna, lahko prenaša samo normalne napetosti in nobenih strižnih napetosti, zato ni trenja pri pretakanju in s tem povezanih izgub. In ker je nestisljiva, ob pove-

šanju tlaka ne spremeni svojega volumna (tudi ne zaradi temperature, ki prav tako povzroča spremembo volumna), zato ni sposobna shraniti energije, kot jo lahko npr. vzmet. Takšna idealna tekočina, zaprta v določenem volumnu, je popolnoma toga, zato tudi ni pojavov, kot so tlačni udari, nihanja, ali neenakomernosti natančnih gibanj ipd.

Veliko nepravilnosti in pojavov, povezanih z natančnostjo delovanja hidravličnih aktuatorjev in posledično hidravličnega sistema kot celote, je tako običajno v tesni povezavi s stisljivostjo hidravlične tekočine. Na stisljivost pa ima izredno velik vpliv prisotnost zraka. Ta se lahko v napravi pojavi zaradi najrazličnejših vzrokov in je v različnih oblikah. Lahko je očem viden, saj se pojavlja v obliki pen ali elementarnih zračnih mehurčkov, lahko pa je »neviden«, saj je raztopljen v tekočini. Slednjega lahko kasneje opazimo v elementarni obliki, ko se spremeni obratovalna točka sistema (predvsem lokalne tlačne razmere), kar je tudi v tesni povezavi s samo zasnovo posameznih gradnikov.

O možnih vzrokih za pojav zračnih mehurčkov oz. vdoru zraka v hidravlični sistem je že bilo kar precej napisanega. Najpogostejši so vsekakor vdor zraka skozi netesna mesta (t. i. aeracija), napačna zasnova gradnikov hidravličnega sistema (npr. rezervoar, cevno omrežje, ventili in ventilski bloki ...) ali pa velike, neprimerne spremembe obratovalne točke, vezane na zasnovu hidravlične naprave [1].

Pene, ki se pojavljajo na površini tekočine v rezervoarju, pravzaprav niso neposredno nevarne in ne vplivajo na stisljivost hidravlične tekočine. Nevarni so zračni mehurčki, ki so v sami tekočini, kar pripelje do različnih posledic. Tako prisotnost zračnih mehurčkov v napravi v prvi vrsti vpliva na stisljivost oz. togost tekočine, kar ima posledično večji ali manjši vpliv na samo delovanje hidravlične naprave, kot so natančnost gibanja aktuatorjev, pojav nihanja, prenos signalov, potreba po spremenjeni nastavitvi parametrov regulatorja itd. V okviru tega prispevka se bomo najprej posvetili sami stisljivosti hidravlične tekoči-

Izr. prof. dr. Darko Lovrec, univ. dipl. inž., doc. dr. Vito Tič, univ. dipl. inž., Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

ne, eni od treh pomembnih snovnih lastnosti hidravlične tekočine, in pa seveda vplivom na njeno spreminjanje. Kot bomo videli v nadaljevanju, je stisljivost hidravlične tekočine zelo odvisna od količine zraka, tudi od vrste hidravlične tekočine in njenih snovnih lastnosti.

■ 2 Vplivi na stisljivost tekočine

Na prvi pogled so vsa tako trdna kot tekoča telesa nestisljiva. Ta groba ocena je zgolj približna, kajti, če jih obremenimo z ustrezno veliko silo (oz. se spremeni temperatura), opazimo, da se njihov volumen spremeni. S tem se je spremenila tudi gostota medija. Medtem ko lahko trdnine mehansko obremenjujemo v obeh smereh, pa lahko fluide – tekočine in pline, obremenjujemo samo v eni smeri – tlačimo. Na tlačno napetost se tekočine odzivajo elastično, podobno trdnini, le da pri slednji v veliko manjši meri. Enako lahko rečemo za primerjavo plinov in tekočine. Če dogajanje oz. obravnavo omejimo samo na tekočine, potem vemo, da tekočina po prenehanju delovanja tlačne napetosti zavzame prvotno prostornino oz. volumen – pojav je znan kot stisljivost tekočine. Stisljivost medija kot njegova realna snovna lastnost je načelno prikazana na sliki 1 [2].

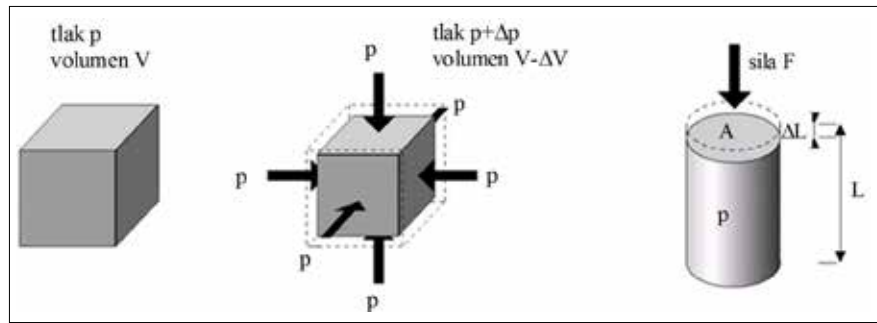
Sprememba volumna tekočine se pojavi tudi s spremembo temperature. Vsaka sprememba tlaka ali/in temperature pripelje do spremembe volumna (in posledično gostote) z različno intenzivnostjo, odvisno od velikosti spremembe in vrste tekočine. Obe vrsti sprememb lahko zapišemo v obliki totalnega diferenciala volumna:

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T dp \quad (1)$$

oz. izraženo na enoto prostornine:

$$\frac{dV}{V} = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p dT + \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T dp \quad (2)$$

Če se pri nadaljnji obravnavi osredotočimo samo na spremembe vo-



Slika 1. Stisljivost medija na splošno (levo) in tekočine v valjasti togi posodi (desno)

lumna zaradi obremenitve – tlaka (drugi del enačbe 2), lahko izrazimo koeficient stisljivosti χ

$$\chi = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T \quad (3)$$

oz. modul stisljivosti kot njegovo recipročno vrednost, ki je analogen modulu elastičnosti trdne snovi:

$$E = \frac{1}{\chi} = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T \quad (4)$$

Pri tem v enačbi (4) predstavlja χ [Pa⁻¹] stisljivost tekočine, ∂p [Pa] spremembo tlaka, ∂V [ml] spremembo volumna in V [ml] začetno velikost volumna tekočine.

Enačba (3) oz. enačba (4) predstavlja hkrati izhodiščno enačbo, na podlagi katere so bili zasnovana naprava za merjenje stisljivosti, izmerjena stisljivost hidravličnega olja in ugotovljen vpliv viskoznosti in vsebnosti zraka na stisljivost (poglavje 3).

Preoblikovana enačba (2) ob upoštevanju modula stisljivosti:

$$\frac{dV}{V} = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T dp = -\frac{1}{E} dp \quad (5)$$

je zelo podobna Hookovemu zakonu iz mehanike trdnin, ki povezuje napetost σ (tlak) z deformacijo ε (sprememba volumna) preko Youngovega modula.

Ker je vrednost modula stisljivosti tekočine E odvisna od temperature in od tlaka, je treba upoštevati izotermno spremembo stanja. Za vrednost modula stisljivosti, npr. za področje hidravlične pogonske teh-

nike in najpogosteje uporabljena hidravlična mineralna olja E'_{olje} (brez vključkov zraka – homogena olja) pri običajnih temperaturah in tlakih (25 °C do 50 °C, 100 bar do 200 bar), se lahko dovolj natančno uporabi kar približna, konstantna vrednost, ki znaša okoli $E'_{olje} \sim 1,66 \cdot 10^9$ N/m² (1660 MPa, $\sim 1,66 \cdot 10^4$ bar). Dejanska vrednost je seveda odvisna od vrste baznega olja, uporabljenih aditivov in, kot bomo videli kasneje, tudi od viskoznosti olja ter seveda količine prisotnega zraka. V primerjavi z modulom elastičnosti za jeklo $E'_{jeklo} \sim 2,1 \cdot 10^{11}$ N/m² pa načeloma velja, da je homogeno mineralno olje veliko bolj elastično oz. stisljivo – kar 130-krat.

V hidravličnem sistemu pa tekočina ni edina komponenta, katere elastičnost je odvisna od obremenitve. Bolj ali manj elastično strukturo imajo namreč vse hidravlične komponente (npr. jeklene oz. še posebej gibke cevi). Zato se je kot zelo praktična izkazala uvedba nadomestnega modula stisljivosti npr. mineralnega olja E'_{olje} , ki ne upošteva samo olja in elastičnosti cevi, v kateri je olje, temveč tudi v olju prisotne zračne mehurčke. Enačbo (4) lahko z upoštevanjem vseh teh deležev preoblikujemo in zapišemo poenostavljeno:

$$\Delta V_{cel} = \Delta V_{olje} + \Delta V_{cev} + \Delta V_{zrak} = V_0 \frac{\Delta p}{E'_{olje}} \quad (6)$$

$$\text{oz. } E'_{olje} = \frac{V_0 \cdot \Delta p}{\Delta V_{cel}} \quad (7)$$

pri čemer v enačbi (6) ΔV_{cev} predstavlja spremembo volumna tekočine v priključenih ceveh, ΔV_{zrak} pa spremembo volumna zaradi zračnih vključkov.

Čeprav obstajajo različne enačbe za preračun nadomestnega modula stisljivosti E'olje, se njegova vrednost najpogosteje določa z eksperimentom, kajti vrednost se spreminja v odvisnosti od stanja sistema, npr. tudi od tega, ali je bil hidravlični sistem dobro ali slabo odzračen.

■ 3 Naprava za merjenje stisljivosti hidravlične tekočine

Stisljivost tekočin lahko v osnovi merimo na dva načina: po spremembi tlaka in volumna ob znanem začetnem volumnu tekočine ter hitrosti zvoka, ki se širi po tekočini. Hitrost zvoka lahko izmerimo na dva načina, in sicer kot spremembo položaja v času ali po frekvenci stojčega valovanja, ki se pojavi v obojestransko zaprti cevi.

V obravnavanem primeru bomo za merjenje stisljivosti uporabili prvi, preprostejši način, pri katerem ni potrebno uporabiti zelo natančnih in predvsem hitrih senzorjev ter elektronike za zajemanje in obdelavo podatkov, dobljeni rezultati pa so za nadaljnjo uporabo dovolj natančni [3], [4].

Tako lahko ugotovimo, da moramo za izračun stisljivosti poznati tri veličine: volumen tekočine, ki jo uporabljamo pri meritvi, spremembo volumna in spremembo tlaka. Volumen spreminjamo s tlačanjem tekočine z batom. Iz premika in preseka bata lahko izračunamo spremembo volumna tekočine ΔV (enačba (8)), pri tem pa ne smemo zanemariti

spremembe volumna, ki nastane zaradi raztezka merilne naprave.

$$\Delta V = V_b - V_{raz} = \frac{S \cdot x}{1000} - V_{raz} \quad (8)$$

V_b [ml] zmanjšanje volumna zaradi premika bata

V_{raz} [ml] povečanje volumna zaradi raztezka merilne naprave

S [mm²] presek bata

x [mm] premik bata

Spremembo tlaka lahko izmerimo z manometrom, začetni volumen pa izračunamo po masi tekočine, ki smo jo nalili v merilno napravo (9).

$$V_0 = \frac{m_b - m_a}{\rho} \quad (9)$$

V_0 [ml] začetni volumen tekočine

m_b [g] masa tekočine in vseh uporabljenih posod, steklovine, ... pred nalivanjem

m_a [g] masa tekočine in vseh uporabljenih posod, steklovine, ... po nalivanju

ρ [g/ml] gostota tekočine

Za natančno merjenje stisljivosti tekočine je torej potrebno poznati tudi natančno vrednost njene gostote.

Naprava za merjenje stisljivosti je prikazana na *sliki 2* in je zasnovana univerzalno, tako da lahko hkrati merimo stisljivost na vse tri omenjene načine.

Naprava za merjenje stisljivosti je sestavljena iz hidravličnih cevi materiala E235, velikosti 30 x 5. Notranji premer cevi oz. premer bata tako znaša 20 mm. Cevi so povezane s hidravličnimi priključki težke izvedbe, velikosti 30S, s progresivnimi

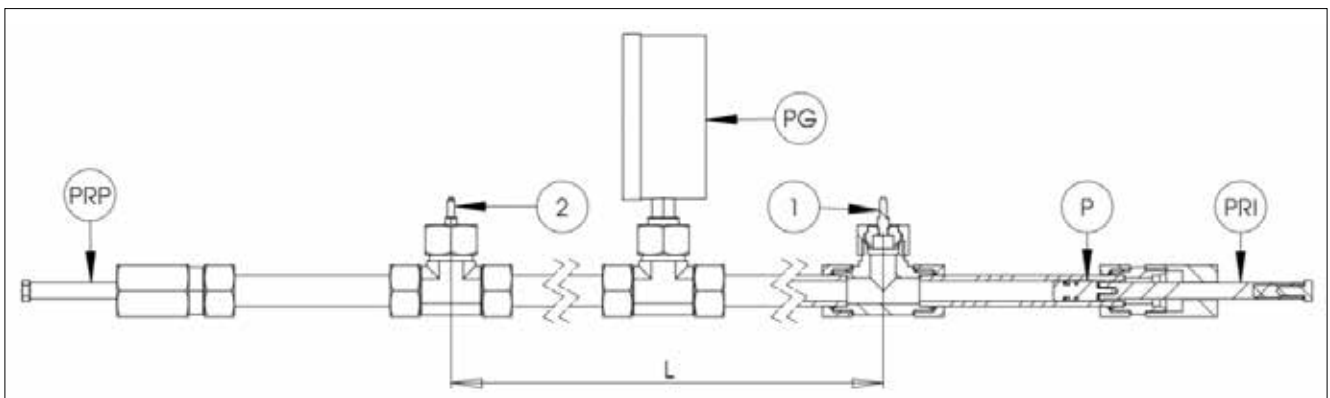
obročki. Na obeh koncih cevi je bat. Bat na levi strani (ki ga premika batnica z oznako PRP) se uporablja za stiskanje tekočine z vrtenjem batnice, na kateri je navoj M16 x 1,5. Glede na število zasukov lahko izračunamo volumen, za katerega se je zmanjšala tekočina. Ko se tekočina stisne, se poveča tlak, ki ga odčitamo na tlačnem senzorju (PG) z digitalnim prikazovalnikom.

Bat na desni strani (P), ki ga premika batnica z oznako PRI, služi za proženje tlačnega udara – za izvedbo ostalih dveh načinov merjenja stisljivosti. Za razliko od PRP je PRI samo vodena in nima navoja.

Tekočino v merilno napravo nalijemo tako, da najprej odstranimo tlačni senzor (PG), ki je na sistem povezan z merilnim priključkom. Nato počakamo, da tekočina iz sistema izpodrine zrak, in ko je ves zrak odstranjen, lahko tlačni senzor (PG) namestimo nazaj in začnemo meritev. Za merjenje spremembe tlaka je bil zaradi lažjega odčitavanja uporabljen senzor (PG) WIKA DG-10-S z digitalnim prikazovalnikom.

■ 4 Merjenje stisljivosti homogenega hidravličnega mineralnega olja

Za merjenje stisljivosti smo uporabili hidravlična mineralna olja Hydrolubric (proizvajalca OLMA, d. o. o.). Za merjenje stisljivosti homogenega olja (brez vključkov zraka) smo uporabili olja različnih viskoznostnih razredov ISO VG 22, VG 32, VG 46, VG 68 in VG 100,



Slika 2. Univerzalna naprava za merjenje stisljivosti

Tabela 1. Izmerjene vrednosti viskoznosti in gostot testiranih hidravličnih olj

Gradacija ISO VG	Viskoznost pri 40 °C [mm ² /s]	Viskoznost pri 100 °C [mm ² /s]	Indeks viskoznosti [-]	Gostota pri 20 °C [kg/m ³]
VG 22	21,18	4,275	107	856,8
VG 32	34,91	6,044	114	862,3
VG 46	46,98	6,97	104	876,2
VG 68	70,07	8,835	98	881,0
VG 100	94,01	10,66	96	888,3

za ugotavljanje vpliva prisotnosti zraka na stisljivost olja (t. i. nehomogeno – spenjeno olje) pa smo uporabili olje viskoznosti VG 68 z 1 volumskim odstotkom zraka.

Natančne vrednosti viskoznosti kot tudi gostote uporabljenih mineralnih olj, izmerjene v laboratoriju proizvajalca, so podane v *tabeli 1*.

Postopek merjenja stisljivosti je bil dejansko izveden na vse tri načine, pri čemer smo najprej za test naprave in postopka izmerili stisljivost znane tekočine – vode, nato pa še stisljivost mineralnega olja (Hydrolubric VG 46). Pri postopku stiskanja so bile tekočine stisnjene na 400 bar in nato razbremenjene nazaj na atmosferski tlak. Podatki so bili odčitani za vsak vrtljaj vijaka – kar pomeni približno vsakih 8 bar.

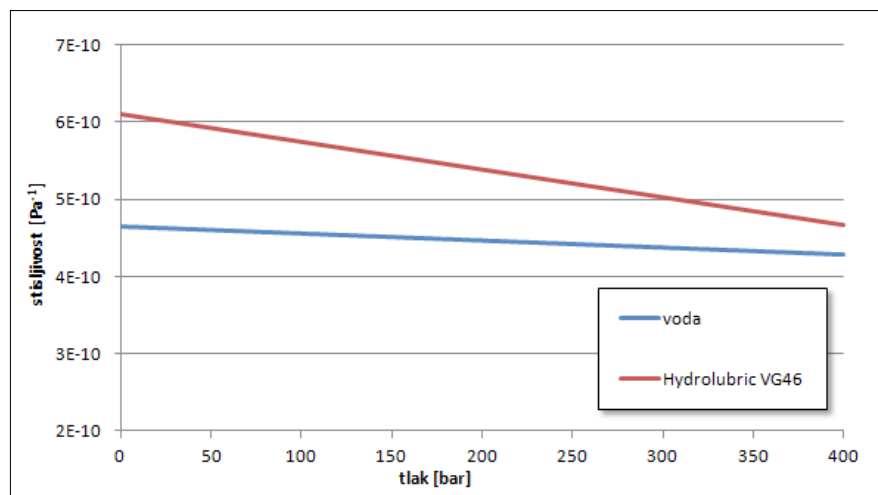
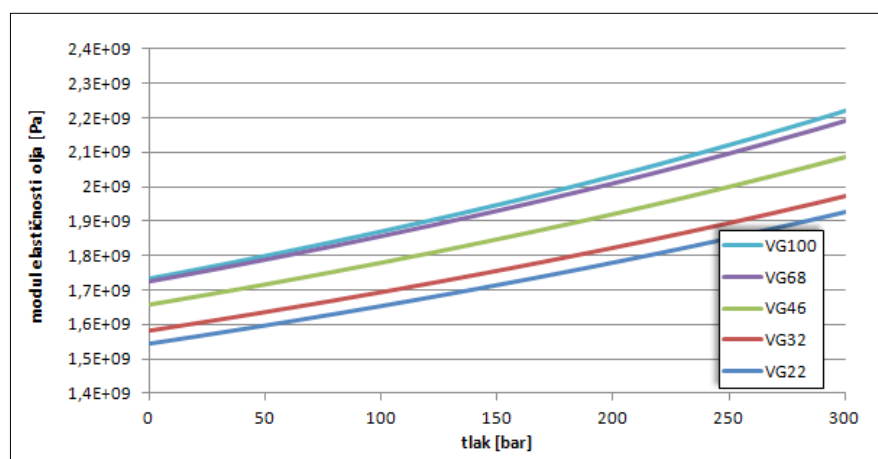
Podatki, dobljeni na podlagi vseh treh načinov, so bili nato združeni, pri čemer so bile izločene vrednosti, ki najbolj odstopajo od ostalih (pojav napake pri meritvi). Nato je bilo izračunano drseče povprečje širine 5 vrednosti, dobljene točke so bile nato aproksimirane s potenčno funkcijo. Zaradi vpliva zraka, ki je raztopljen v tekočini ali je ostal ujet v napravi, predvsem v priključkih, na meritve pri nižjih tlakih (praktično nižjih od 70 bar) so bile vrednosti nižje od 70 bar izločene, preostale vrednosti pa so bile aproksimirane z linearno funkcijo.

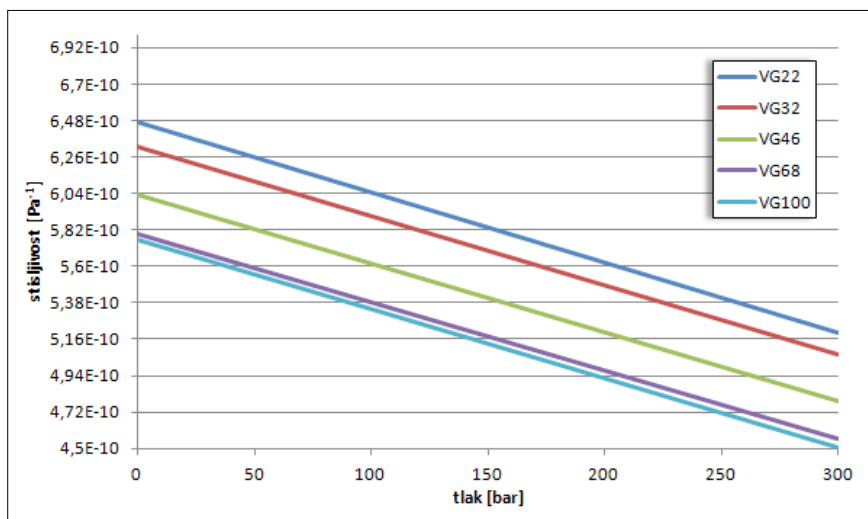
Za prikaz sta bolj primerni linearna aproksimacija in ekstrapolacija od 70 bar navzdol, saj ne upošteva vplivov zraka v sicer homogeni tekočini. Na ta način lahko tudi najbolj natančno določimo stisljivost pri atmosferskem tlaku in primer-

jamo z drugimi tekočinami, kot to prikazuje *slika 3*. (Vsi postopki določanja stisljivosti oz. modula elastičnosti različnih tekočin in primerjava stisljivosti različnih tekočin so podrobneje predstavljeni v [3]).

Rezultate meritev, odvisnost modula elastičnosti oz. stisljivosti v odvisnosti od tlaka za običajna hidravlična mineralna olja različnih viskoznosti prikazujeta *sliki 4* in 5 [5].

Iz potekov spreminjanja modula elastičnosti za homogena olja oz. njegove stisljivosti je razvidno, da imajo olja višjih viskoznostnih razredov večjo vrednost modula elastičnosti in obratno. To pomeni, da olja višjih viskoznosti (ta imajo tudi večjo gostoto – *tabela 1*) zagotavljajo večjo togost sistema, natančnejši prenos sile in večjo trdnost mazalnega filma.


Slika 3. Prikaz spreminjanja stisljivosti vode in hidravličnega olja

Slika 4. Odvisnost vrednosti modula elastičnosti od tlaka za olja različnih viskoznosti [5]



Slika 5. Odvisnost stisljivosti od tlaka za olja različnih viskoznosti [5]

Že pri merjenju homogenega olja smo videli, da ima na meritev velik vpliv zrak, ki je raztopljen v olju oz. je ostal ujet v mrtvih volumnih merilne naprave, ki je ni mogoče popolnoma odzračiti. Načeloma gre za majhne % vrednosti (ocenjeno na < 0,5 %). Zato so bile vrednosti za stisljivost pri nizkih tlakih izločene in potek ekstrapoliran.

5 Vpliv zraka na stisljivost hidravličnega mineralnega olja

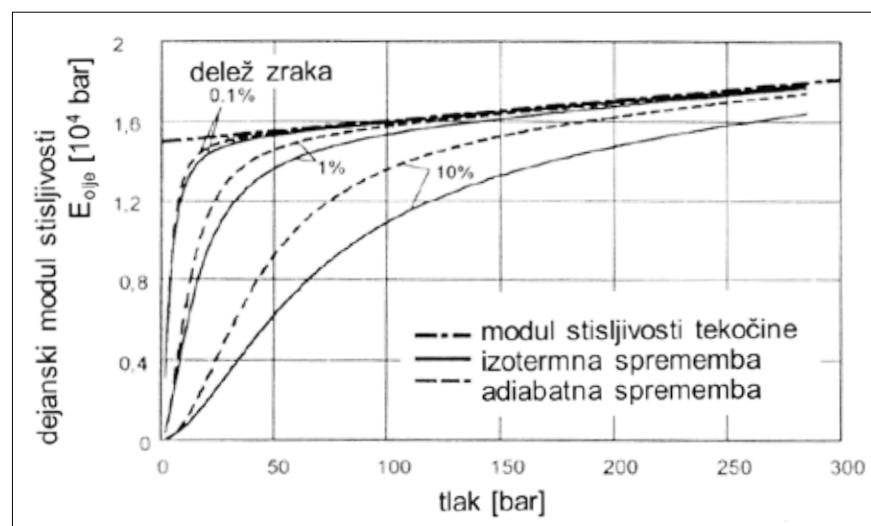
V hidravličnih napravah z nizkimi števili prečrpavanja tekočine (število pove, kolikokrat v časovni enoti se vsa tekočina, ki je v rezervoarju, prečrpa) najdemo deleže neraztopljenega zraka v velikosti od 5 vol. % do 10 vol. % (to še posebej velja za mobilno hidravliko). Tako tekočina nima možnosti izločitve zračnih mehurčkov (kot tudi ne trdnih delcev nečistoč in se ohladiti), kar pogosto pripelje tudi do nevarnosti prekomernega penjenja olja. Kot je znano, pa imajo ti zračni mehurčki zelo velik vpliv na stisljivost hidravlične tekočine ter s tem na togost in dinamiko celotnega sistema [6].

Če je volumen mešanice hidravlične tekočine in zraka izpostavljen delovanju tlaka, se bo modul stisljivosti spremenil – nadomestni modul stisljivosti za tekočino in zrak. Izhajajoč iz enačbe (6) lahko zapišemo:

$$E_{o-z} = - \frac{V_{olja} + V_{zrak}}{\frac{dV_{olja}}{dp} + \frac{dV_{zrak}}{dp}} \quad (10)$$

Teoretično izračunane vrednosti in potek spreminjanja nadomestnega modula stisljivosti za primer mešanice hidravličnega mineralnega olja in zraka, za 0,1 %, 1 % in 10 % vsebnosti zraka, pri izhodiščni vrednosti modula stisljivosti tekočine $E_{olja} \approx 1600$ MPa, prikazuje slika 6 [6].

Zaradi različnih vplivov, ki se pojavljajo v zvezi z zrakom v tekočini (izločanje zraka iz tekočine in ponovno vezanje zraka s tekočino) in se ne dajo dovolj enostavno zajeti z enačbo, dejanske vrednosti modula stisljivosti odstopajo od izračunanih. V primeru natančne obravnave



Slika 6. Modul stisljivosti mešanice mineralnega olja in zraka [6]

dinamike sistema je vsekakor treba vrednosti modula stisljivosti določiti po eksperimentalni poti.

Pri tem se takoj pojavi problem, kako zagotoviti oz. dovolj natančno generirati vrednost volumskega deleža zraka, predvsem tisto nižjih vrednosti. Eno od možnosti predstavlja posreden način določanja vpliva zraka s hidravličnim valjem in napravo za stalno dovajanje zračnih mehurčkov [7], a je za to potreben dokajšen obseg ustrezne opreme.

V obravnavanem primeru smo meritve stisljivosti homogenega olja in tudi olja z vsebnostjo zraka izvajali na isti napravi, pri čemer smo se pri meritvi stisljivosti olja z vsebnostjo zraka omejili na olje viskoznosti VG 68 in višji volumski delež (%) prisotnega zraka. Tako smo olju dodali zrak z razpršilnikom zraka oz. zračnim difuzorjem, ki se sicer uporablja pri standardnem testu penjenja po ASTM D892. V levem delu slike 7 je prikazan zračni difuzor, s katerim smo olje spenili, v desnem delu pa videz spenjenega olja.

Temu primeren pa je bil tudi potek priprave na meritev stisljivosti. V merilno čašo natočimo približno 100 ml več olja, kot ga potrebujemo za izvedbo meritve, olje stehamo in ga s pomočjo difuzorja močno spenimo. Napravo za merjenje stisljivosti na eni strani podložimo, da zagotovimo izločanje viška zračnih mehurčkov.



Slika 7. Zračni difuzor za penjenje olja (levo) in spenjeno olje (desno)

Pri meritvi stisljivosti tako spenjena olja je treba zelo natančno določiti količino olja, ki je za 1 % manjša od celotne količine olja, ki gre v napravo. Ker je masa tekočine natančno poznana od prejšnjih poskusov stisljivosti, smo spenjeno olje v napravo dolivali toliko časa, dokler ni bila razlika v masi enaka pred tem izračunani potrebni masi tekočine. Pomembno pri vsem tem je, da med penjenjem v olje vnesemo več kot 1 volumski odstotek zraka, da lahko med odzračevanjem neprestano dolivamo olje. S tem zmanjšamo možnost nastanka zračnega žepa pred izvedbo meritve. Na koncu postopka polnjenja naprave zatesnimo čep za dolivanje in opravimo meritve.

Rezultat meritev, potek stisljivosti homogenega in spenjenega olja z 1-odstotno vsebnostjo zraka v odvisnosti od tlaka prikazuje *slika 8*. Na osnovi eksperimentalno dolo-

čene spremembe stisljivosti v odvisnosti od tlaka je moč ugotoviti, da ima prisotnost zraka do tlaka cca. 50 bar zelo velik vpliv na stisljivost, v področjih višjih tlakov, nad 100 bar, pa je razlika v stisljivosti spenjenega in čistega olja zgolj 3 %. Izsledki sovpadajo z rezultati, dobljenimi po teoretični poti.

6 Zaključek

Prisotnost zraka v olju ustvarja nehomogeno tekočino, kar ima velik vpliv na gostoto, viskoznost in predvsem modul elastičnosti olja. Vemo, da je zrak v olju lahko v več oblikah: v obliki majhnih mehurčkov, v obliki pen ali pa je vezan v molekulah olja, pri čemer so zračni mehurčki najbolj nezaželena oblika zraka v hidravličnih napravah.

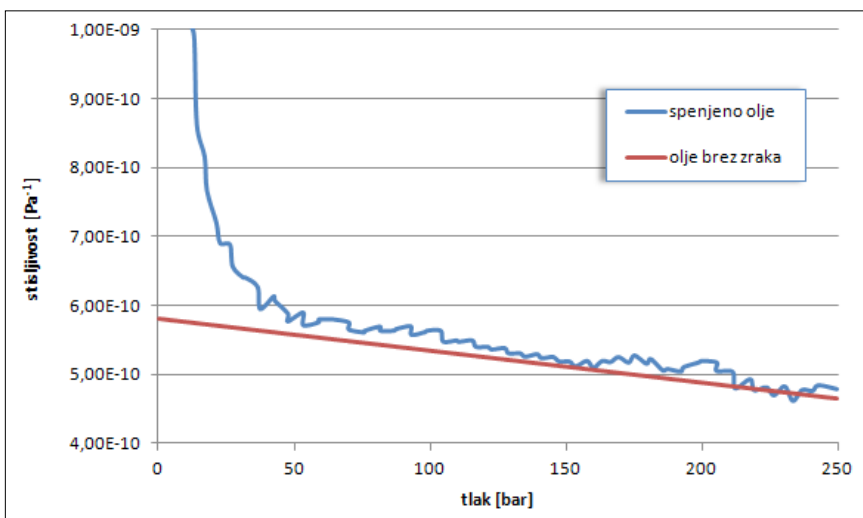
V prispevku smo se dotaknili pomena stisljivosti hidravličnih tekočin, pri čemer je nadaljnja obravnava

temeljila na običajnih mineralnih hidravličnih oljih različnih viskoznosti. Spoznanja na podlagi teoretične obravnave pomena stisljivosti in vplivnih faktorjev so bila preverjena z eksperimenti. Za te namene je bila uporabljena univerzalna, a preprosta naprava, ki omogoča merjenje stisljivosti na tri različne načine.

V tem prispevku smo za merjenje stisljivosti uporabili metodo dV/dp – beleženje spremembe tlaka ob spremembi volumna, pri čemer smo vrednosti beležili v obeh smereh sprememb in jih nato obdelali za namene prikaza v diagramu. Meritve stisljivosti so bile najprej opravljene za različne standardizirane viskoznosti običajnega homogenega mineralnega olja, tj. brez vključkov zraka, v nadaljevanju obravnave pa je bil v ospredju vpliv prisotnosti različnih odstotnih deležev zračnih mehurčkov v olju. Tako povečana stisljivost hidravlične tekočine se odraža v raznolikih in različno vplivnih pojavih pri delovanju hidravličnih aktuatorjev in celotne hidravlične naprave.

Viri

- [1] Lovrec, D.: Vzroki za prisotnost zraka v hidravličnem sistemu. Ventil, ISSN 1318-7279, avg. 2016, letnik 22, št. 4, str. 310–315.
- [2] Lovrec, D., Tašner, T.: Hidravlične tekočine z višjim modulom stisljivosti in vpliv na delovanje hidravlične naprave. Zbornik prispevkov Mednarodne konference Fluidna tehnika 2011, 15. in 16. september 2011, Kongresni center Habakuk, Maribor, 2011, str. 201–216.
- [3] Tašner, T.: Napredni koncepti vodenja in nadzora energijsko učinkovitih hidravličnih sistemov : doktorska disertacija. [Maribor: T. Tašner], 2014. XI, 163 str., ilustr. <https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=46762>. [COBISS.SI-ID 277016064].
- [4] Kambič, M., Kalb, R., Tašner, T., Lovrec, D.: High Bulk Modulus of Ionic Liquid and Effects on Performance of Hydraulic System. The scien-



Slika 8. Stisljivost spenjenega (1-odstotni delež zraka) in homogenega olja v odvisnosti od tlaka