

PREDNOST UPORABE INŽENIRSKIH POLIMEROV ZA TRAJNOSTNE HIDRAVLICNE KOMPONENTE

Ana Trajkovski, Nejc Novak, Jan Pustavrh, Mitjan Kalin, Franc Majdič

Izvleček:

Inženirski polimeri so dokazali, da imajo zelo obetavne tribološke lastnosti in uspešno sledijo visoko zmogljivim termoplastom. V naših raziskavah smo preizkušali in analizirali polioksimetilen (POM) za zelo zahtevne delovne pogoje hidravličnih vklopno-izklopnih ventilov. Testirali smo čisti POM in POM, ojačan s 30 % ogljikovih vlaken (POM CF30), v standardnem mineralnem hidravličnem olju ISO VG 46, raztopini glicerola in vode in demineralizirani vodi pri sobni ter povišani temperaturi.

Rezultati so pokazali zelo nizek koeficient trenja (od 0,027 do 0,033) in specifične obrabe ($\sim 10^{-7}$ mm³/Nm) v mešanici glicerola in vode, primerljivo z vrednostmi, izmerjenimi v hidravličnem olju, in nižjo od izmerjenih v vodi (koeficient trenja $\sim 0,14$, specifična obraba ($\sim 10^{-6}$ mm³/Nm) pri sobni temperaturi. Pri povišani temperaturi se koeficient trenja v hidravličnem olju in raztopini glicerol-voda nekoliko poveča, v vodi pa zmanjša in vrednosti postanejo primerljive za vsa maziva. Na podlagi rezultatov sta tako polioksimetilen kot mešanica glicerola in vode lahko dobra alternativa za standardno hidravlično olje in jeklene tribološke pare, kar vodi do odličnih triboloških lastnosti ob zmanjšanju mase komponent.

Ključne besede:

polimer, polioksimetilen, glicerol, voda, hidravlično olje, trenje, obraba, hidravlika

1 Uvod

Hidravlični sistemi so široko uporabljani tehniški sistemi v industriji. Omogočajo velike sile, togost in dobro vzdržljivost uporabe. Eden izmed glavnih izzivov trajnostne hidravlike je povečati učinkovitost hidravličnih komponent. To je pogosto privedlo do razvoja novih komponent ali uporabe novih materialov in tehnologij mazanja [1]. V zadnjem desetletju so bile izvedene številne študije o triboloških lastnostih različnih naprednih polimernih kompozitov [2, 3]. Njihove tribološke lastnosti je mogoče izboljšati z različnimi funkcionalnimi polnili. Tako bi jim lahko podaljšali uporabno dobo ali dodatno zmanjšali trenje in obrabo ter izboljšali odziv pri večjih obremenitvah, drsnih hitrostih, tlakih ali temperaturah [10]. Polimeri so se izkazali kot odlična alternativa klasičnim komponentam iz jekla v različnih industrijskih aplikacijah za zobnike, črpalke, hidravlične valje, tesnila, ležaje itd. [4-7]. V primerjavi s tradicionalno uporabljaj-

nimi jeklenimi zlitinami je razmerje med trdnostjo in gostoto ojačanih polimernih kompozitov do 13,5-krat večje od jekla [8]. Uporaba polimerov in polimernih kompozitov z nizko specifično težo in visoko trdnostjo namesto kovin za izdelavo različnih fluidnih pogonskih elementov in komponent ima velik potencial za zmanjšanje teže komponent in izgub energije. V nedavni študiji je bil izdelan prototip hidravličnega valja iz kompozitne strukture s 57 % nižjo težo, medtem ko je ohranil enako zmogljivost kot običajni kovinski hidravlični valj [7]. Raziskave kažejo, da bi lahko uporaba omejenih inovativnih materialov in rešitev v 15 letih zmanjšala izgubo energije zaradi trenja in obrabe za približno 40 % [2].

Od ultravisoko zmogljivih polimerov do dostopnih polimerov se mehanske lastnosti spreminjajo v nasprotju s ceno polimera (lastnosti reprezentativnih polimerov iz posameznih skupin so primerjane z nerjavnim jeklom AISI 440 C [2, 9-11] v *preglednici 1*). Elementi, narejeni iz naprednih kompozitov, delujejo z različnimi mazivi, kot so hidravlična olja, voda, emulzije, nano- in ionske tekočine [12, 13]. Najbolj pogosto je raziskan visoko zmogljivi PEEK (polyetheretherketone) z različnimi dodatki (ogljikova vlakna, steklena vlakna, grafit, polytetrafluoroethylene - PTFE itn ...) v suhem, olju in vodi. Po lastnostih in ceni mu sledijo tudi visoko zmogljivi

Dr. Ana Trajkovski, univ. dipl. inž., **Nejc Novak**, mag., **Jan Pustavrh**, mag., **prof. dr. Mitjan Kalin**, univ. dipl. inž., **izr. prof. dr. Franc Majdič**, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

Preglednica 1 : Mehanske lastnosti polimerov v primerjavi z jeklom

Material	Gostota ρ [g/cm ³]	Modul elastičnosti E [GPa]	Natezna trdnost Rm [MPa]	Trdota [HV]
Nerjaveče jeklo AISI 440-C	7,67	200	760–1960	-695
Ultravisoko zmogljivi (PEEK)	-1,32	-4,2–8,1	-110	do 250
Visoko zmogljivi (PPS)	-1,43	-3,3–4,4	-75	do 220
Inženirski (POM, UHMWPE, PA)	-1,13–1,5	-1,7–3,3	-40–80	do 120
Dostopni (PE, PTFE)	-2,18	-0,5	-10	do 100

(polyphenylenesulphide) PPS in njegovi kompoziti [14–19]. Polioksimetilen (POM) je eden izmed inženirskih polimerov »srednjega razreda«, katerega cena je do 10-krat nižja v primerjavi z ultravisoko zmogljivimi polimeri. Ima majhno specifično težo in nizko absorpcijo vode ter dobre tribološke lastnosti. Zato je eden najpogosteje uporabljenih inženirskih polimerov [4, 10]. Uspešno lahko sledi zmogljivosti PPS (polifenilensulfida) in PEEK (polietereterketona), kadar se uporablja za gerotor motorje ali celo sledi učinkovitosti klasičnega kovinskega varnostnega ventila [5]. V naši nedavni študiji je POM, ojačan z ogljikovimi vlakni, dal primerljive rezultate s štirimi različnimi visoko zmogljivimi polimernimi kompoziti v čistem glicerolu in vodi [20].

Mineralno hidravlično olje je običajno uporabljano mazivo oziroma pogonski medij za hidravlične stroje in naprave. Velika slabost trenutno še vedno najbolj razširjene oljne hidravlike pa je nevarnost onesnaževanja okolja pri naključnem izteku olja, ki ga ni mogoče kontrolirati, niti uporabljenega olja efektivno ponovno uporabiti ali skladiščiti. Zato danes postajajo zelena maziva obvezna v ladijskih in gozdarskih strojih in so zaželeni v različnih vrstah mobilnih strojev in še dalje v industriji [21]. Okolju prilagojena maziva, kot so rastlinska olja, sintetični estri, polialfaoleini, poliglikoli in voda, kažejo nizko toksičnost ter odlično biološko razgradljivost [22]. Najstarejši odgovor na vprašanje o trajnostnih mazivih je uporaba čiste vode ali vode z različnimi dodatki, ki lahko popravijo izjemno nizek koeficient trenja viskoznosti vode in težave s korozijo [23, 24]. Vendar pa je razpoložljivost hidravličnih komponent za vodno hidravliko omejena zlasti zaradi zelo nizke viskoznosti vode (100-krat nižja v primerjavi s tradicionalnimi mineralnimi baznimi olji) in potrebe po korozivni odpornosti uporabljenih materialov [23]. To pa močno omejuje in povečuje ceno uporabe vodne hidravlike. Trenutni stroški komponent iz nerjavnega jekla od 3- do 4-krat presegajo ceno standardnih oljnih hidravličnih komponent [5, 13]. Glicerol je še ena zanimiva biokompatibilna alternativa, ki je glavni stranski produkt pri proizvodnji biodizla [25]. Čeprav ima dobre mehanske in tribološke lastnosti, ima tudi skoraj 20-krat večjo viskoznost v primerjavi s tradicionalnimi mineralnimi baznimi olji [26]. Tako vi-

soka viskoznost ni posebej zaželeni, ker so večje izgube energije zaradi potrebe po več energije za premagovanje debelejšega mazalnega filma. To ima za posledico degradacijo maziva in morebitno zgodnjo odpoved elementov oziroma komponent ali sistema. Vendar pa se glicerol odlično raztopi v vodi in tako je visoko zmrzišče glicerola [27, 28], debelino filma in viskoznost mogoče nadzorovati z ustrežno količino vode. Doslej so bile študije osredotočene predvsem na uporabo vodnih raztopin glicerola v običajnih kontaktih jeklo-jeklo. Le nekaj študij obravnava sočasno uporabo polimernih kompozitov in glicerola ali podobnih zelenih maziv [20, 29]. V naši nedavni študiji smo primerjali pet različnih polimernih kompozitov [20]. Glicerol se je izkazal kot odlično mazivo, zlasti za tri polimere z višjo trdoto.

Namen te študije je analizirati tribološke lastnosti komercialno dostopnega čistega POM-a in POM-a, ojačanega s 30 % ogljikovimi vlakni (POM CF30), v drsnem paru polimer-jeklo v standardnem mineralnem hidravličnem olju ISO VG 46, demineralizirani vodi ter raztopini glicerola in vode. Primerjali in analizirali bomo njihove tribološke lastnosti pri različnih delovnih temperaturah (sobni in povišani), kot se pričakuje v hidravličnih aplikacijah.

2 Materiali in metode

2.1 Preizkušanci

Za tribološke teste tipa »kroglica-disk« smo pripravili vzorce čistega POM-a in POM-a, ojačanega s 30 % ogljikovih vlaken (POM CF30). Polimerne vzorce smo izrezali iz komercialno dostopne palice s premerom 30 mm na debelino 6 mm. Vzorce smo polirali v več korakih z avtomatsko napravo za poliranje in pripravo vzorcev (RotoPol-21, RotoForce-3) do končne hrapavosti $R_a = 0,1 \mu\text{m}$. Kroglica, uporabljena tekom recipročnega tribološkega testiranja, je bila standardna kaljena ležajna kroglica premera 25 mm, izdelana iz nerjavnega jekla AISI 440-C. Pred vsakim testom smo polimerne vzorce, kroglico, prijemale ter banjico očistili z medicinskim bencinom, etanolom in posušili v toku zraka.

Preglednica 2 : Lastnosti uporabljenih maziv

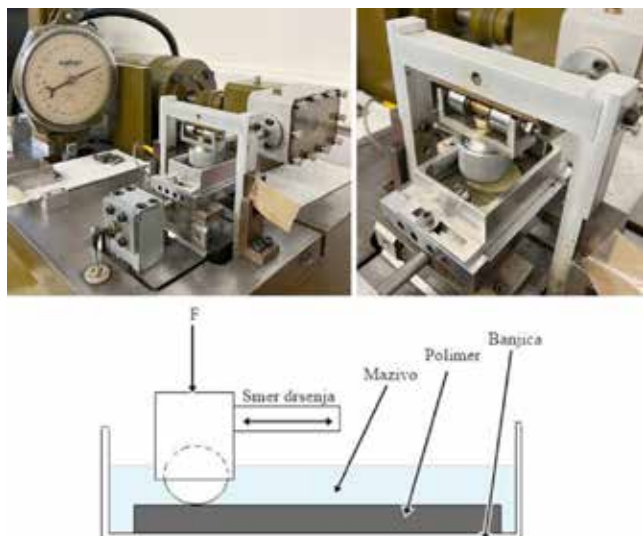
Mazivo	Kinematična viskoznost [mm ² /s] pri 25 °C	Kinematična viskoznost [mm ² /s] pri 80 °C	Gostota [g/cm ³] pri 25 °C	Gostota [g/cm ³] pri 80 °C
ISO VG 46	100	9	0,86	0,85
40 % glicerola in 60 % vode (G + V)	11,59	2,19	1,17	1,12
Demineralizirana voda (V)	0,89	0,36	0,99	0,97

2.2 Mazivo

V študiji smo uporabili tri različna maziva. Prvo mazivo je bilo komercialno dostopno, najpogosteje uporabljeno mineralno hidravlično olje ISO VG 46. Drugo mazivo je bila mešanica glicerola in vode. Na podlagi naših predhodnih študij smo dokazali, da z dodajanjem do 40 % vode v mešanici glicerola in vode ohranimo dobre mazalne lastnosti čistega glicerola [30]. Za pripravo maziva mešanice 40 % glicerola in 60 % vode (G + V) smo uporabili komercialno dostopen redestilirani glicerol z vsebnostjo glicerola $\geq 99,5$ %. Kot tretje referenčno mazivo je bila uporabljena demineralizirana voda (V). Lastnosti izbranih maziv so bile določene z avtomatskim viskozimetrom SVM 3001 (Anton-Paar). Lastnosti so predstavljene v *preglednici 2*.

2.3 Tribološki testi

Tribološke teste smo izvajali na visokofrekvenčnem tribometru Cameron-Plint TE 77 (*slika 1*). Med preskusom jeklena ležajna kroglica recipročno drsi po polimerni plošči v obliki diska. Povprečna hitrost drsenja je bila nastavljena na 0,2 m/s (frekvenca 40 Hz) z dolžino giba 2,4 mm. Normalna obremenitev je bila nastavljena na 50 N (največji Hertzov tlak pa med 90 MPa in 150 MPa). Pred vsakim preizkusom



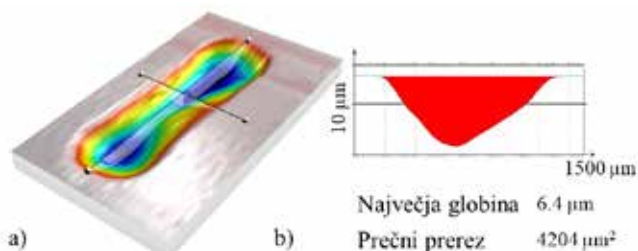
Slika 1 : Tribološko preizkuševališče

smo vzorce polimera v celoti potopili v izbrano mazivo. Vzorec je bil postavljen v banjico z mazivom, pod katero pa je bil grelni element za nadzor in ohranjanje konstantne temperature med preskusom (pri povišani temperaturi 80 °C). Posebna pozornost je bila namenjena vzdrževanju konstantne ravni maziva med testom, tako da je bil tribološki par vedno popolnoma potopljen v izbrano mazivo. Po vsakem preizkusu je bilo na kroglici označeno kontaktno drsno območje.

Med preizkusi se je samodejno beležila trenutna vrednost koeficienta trenja. Vsak test je trajal 90 minut oziroma 216.000 ciklov, in sicer na podlagi preliminarnih testov, ki so pokazali, da se v tem času doseže stabilna vrednost koeficienta trenja. Vsako meritev smo ponovili trikrat, za primerjalno analizo pa smo uporabili povprečno vrednost ustaljenega koeficienta trenja.

2.4 Analiza obrabne površine

Volumen obrabe polimernih diskov je bil izračunan iz dimenzij obrabnih sledi, ki so bile po triboloških testih izmerjene s 3D digitalnim mikroskopom z dodatnim nanotočkovnim konfokalnim profilometrom Hirox HRX-01 & NPS. Za vsako kaloto smo določili 3D-profil, iz katerega smo s programsko opremo Mountain Map odčitali dimenzije obrabne kalote in karakteristične prereze na več značilnih mestih vzdolž profila obrabne sledi [20]. Postopek je prikazan na *sliki 2*. Digitalni mikroskop je omogočil tudi določitev oblike in dimenzij površinskih filmov na jekleni kroglici.



Slika 2 : Postopek za analizo obrabe s 3D digitalnim mikroskopom: a) 3D-profil obrabljenega volumna, b) merjenje površine prečnega prereza na določenem mestu

3 Rezultati

3.1 Trenje

Potek koeficienta trenja pri posameznih materialnih parih med opravljenimi meritvami je prikazan na *sliki 3* in *sliki 4*. Pri mazanju z mineralnim oljem ISO VG 46 in ločeno mazano z mešanico glicerola in vode (G + V) koeficient trenja doseže stabilno vrednost zelo hitro, v prvih 100 sekundah testa ne glede na temperaturo. Krivulje, izmerjene za POM, sledijo vrednostim, izmerjenim za ojačani POM CF30.

Koeficient trenja, izmerjen v vodi, narašča v prvih 1000 sekundah za POM in približno 3000 sekundah za ojačani POM CF30. Izmerjene vrednosti za ojačani POM CF30 so precej višje in nestabilne v primerjavi s čistim POM, še bolj pa v primerjavi z meritvami pri drugih dveh mazivih; vse troje pri sobni temperaturi.

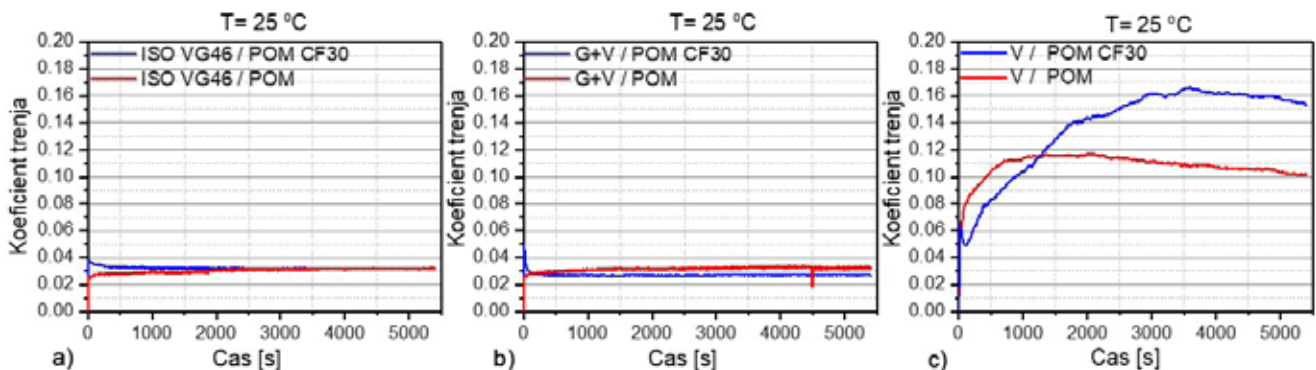
Glede na rezultate meritev mešanica G + V omogoča dober mazalni film, primerljiv s hidravličnim oljem, in sicer na sobni in povišani temperaturi. Povečanje izmerjenega povprečnega koeficienta trenja, opaženo v vodi, kaže, da voda ni učinkovito ločila kontaktnih površin polimernih ploščic in jeklene kroglice. Fluktuacije, opažene v primeru POM

CF30, kažejo, da ojačitve vnašajo dodatne nestabilnosti v opazovanih pogojih obrabe.

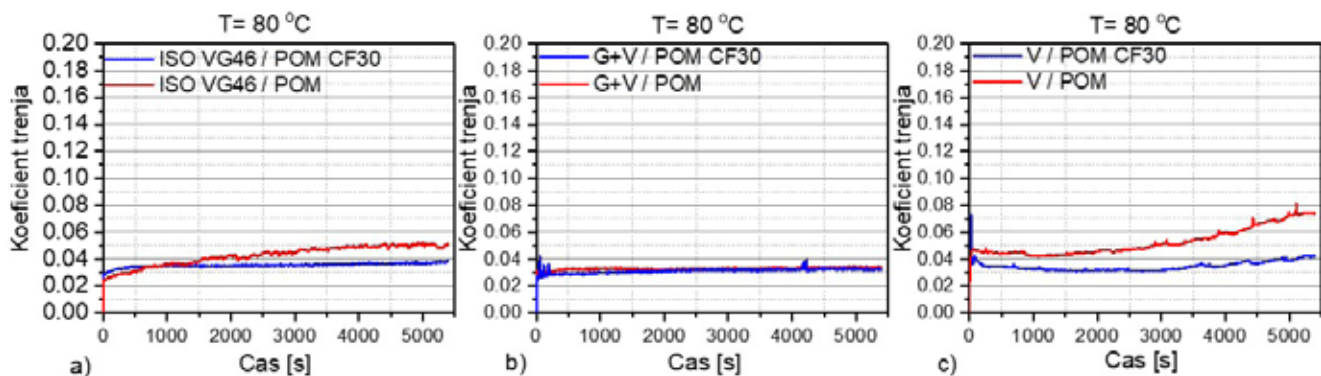
Povprečne vrednosti ustaljenega koeficienta v olju ISO VG 46, raztopini glicerola in vode G + V ter demineralizirani vodi so prikazane na *sliki 5*. Rezultati so pokazali primerljive in nizke vrednosti koeficienta trenja 0,033 in 0,027 v primeru POM CF30 oziroma 0,031 in 0,032 v primeru POM v olju in raztopini G + V pri sobni temperaturi (*slika 5a*). Izmerjene vrednosti koeficienta trenja so v vodi pri sobni temperaturi do 6-krat višje za POM CF30 oziroma 3,5-krat višje za POM (*slika 5a*) v primerjavi z izmerjenimi v olju in raztopini G + V.

S *slike 5b* je tudi razvidno, da so izmerjene vrednosti koeficientov trenja v vseh mazivih primerljive pri višji temperaturi. Za ojačani POM CF30 pride do manjšega zvišanja (10 %) v olju in raztopini G + V ter do značilnega znižanja v vodi (4-krat) v primerjavi z meritvami na sobni temperaturi. V primeru POM se koeficient trenja nekoliko poveča pri višji temperaturi v olju (približno 50 %), v raztopini nekoliko zniža (10 %) ter značilno zniža v vodi (2-krat) v primerjavi z meritvami na sobni temperaturi.

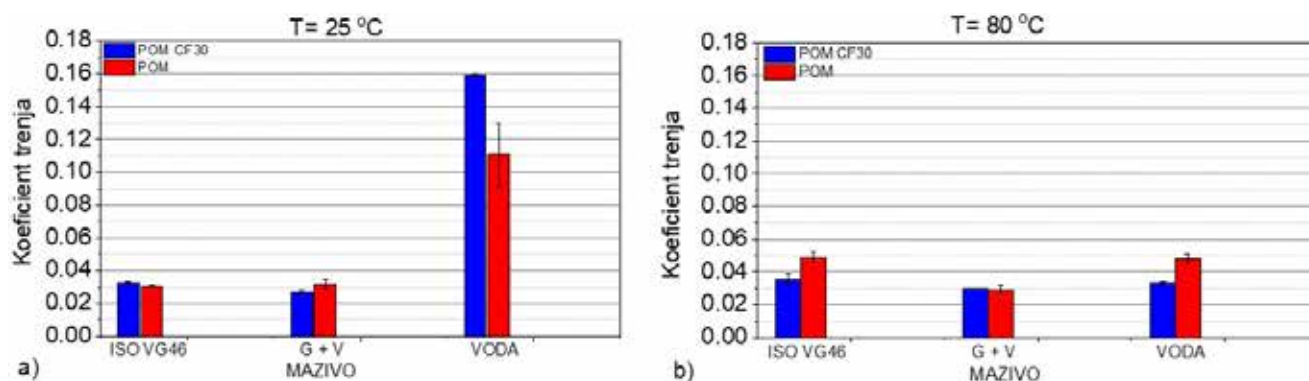
Najnižji koeficient trenja je izmerjen v raztopini G + V na obeh temperaturah za čisti POM in ojačani POM CF30.



Slika 3 : Krivulje poteka koeficienta trenja kot funkcija časa drsenja v tribološkem kontaktu, mazano z: a) oljem ISO VG46; b) raztopino glicerola in vode (G + V); c) demineralizirano vodo (V); vse troje pri sobni temperaturi



Slika 4 : Krivulje poteka koeficienta trenja kot funkcija časa drsenja v tribološkem kontaktu, mazano z: a) oljem ISO VG 46; b) raztopino glicerola in vode (G + V); c) demineralizirano vodo (V); vse troje pri povišani temperaturi (80 °C)



Slika 5 : Koefficient trenja polimera v olju ISO VG46, raztopini glicerola in vode (G + V) in demineralizirani vodi a) pri sobni temperaturi; b) povišani temperaturi

3.2 Obraba

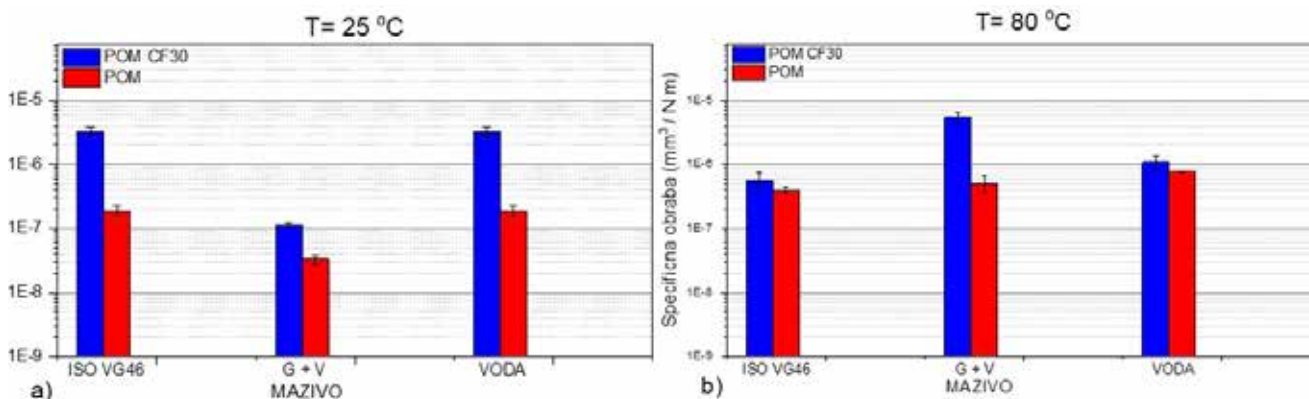
Na podlagi izmerjenih dimenzij obrabnih kalot vzdolž 3D-profila polimernih vzorcev smo izračunali specifično obrabo v primeru uporabe hidravličnega olja ISO VG 46, raztopine G + V in demineralizirane vode kot maziva. Rezultati so prikazani na sliki 6.

Specifična obraba je tako kot koefficient trenja primerljiva pri uporabi hidravličnega olja ISO VG 46 in raztopini G + V. Večina vrednosti za POM CF30 je v področju 10^{-7} mm³/Nm za mazivi ISO VG 46 in G + V pri sobni temperaturi. Za čisti POM je obraba nekoliko nižja, in sicer v področju približno 3×10^{-8} mm³/Nm prav tako pri sobni temperaturi. Specifična obraba pri obeh mazivih (ISO VG 46 in G + V) je nižja od izmerjene v vodi ($\sim 3 \times 10^{-6}$ mm³/Nm za ojačani POM CF30 ter $\sim 1 \times 10^{-7}$ mm³/Nm za čisti POM) pri sobni temperaturi.

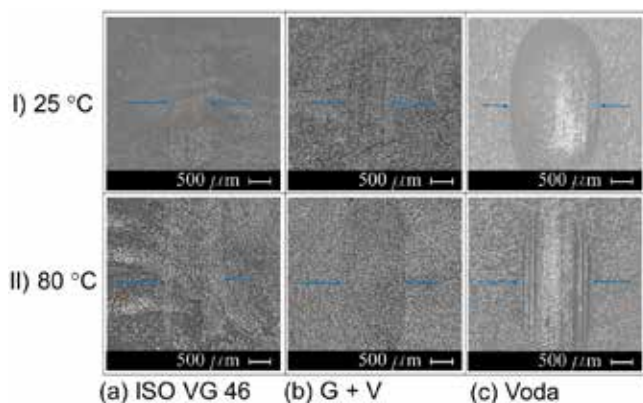
Specifična obraba se je v hidravličnem olju (ISO VG 46) in raztopini G + V pri povišani temperaturi (T = 80 °C) znatno povečala in postala primerljiva s specifično obrabo, izmerjeno v vodi (reda velikosti $\sim 10^{-6}$ mm³/Nm).

3.3 Površinska analiza

Izbrane obrabljene kalote polimernih vzorcev so predstavljene na slikah 7 in 8, narejenih z digitalnim mikroskopom. Kalota ojačanega POM CF30 je podobna po obliki in velikosti (širina ~ 900 μm, dolžina ~ 3500 μm) v olju ISO VG 46 (slika 7 I a) in raztopini G + V (slika 7 I b). Obrabna sled je pri povišani temperaturi le približno 2-krat širša (širina ~ 1400 μm) (slika 7 II a in b). Mehanizmi obrabe v olju in mešanici G + V so podobni, maziva tvorijo dovolj debel film za ločevanje površin v stikih. Najožja obrabna sled je opažena pri olju pri sobni temperaturi (~ 936 μm, slika 7 I a). Obrabna sled ni bistveno širša v mešanici glicerola in vode ($\sim 8\%$ povečanje) pri sobni temperaturi, čeprav so opazne raze vzdolž smeri drsenja, zlasti na sredini obrabne brazgotine (slika 7 I b). V primeru demineralizirane vode pri sobni temperaturi se poveča širina obrabne kalote ($\sim 2,5$ -kratno povečanje) kot tudi število in intenzivnost raz (slika 7 I c). Pri povišani temperaturi (T = 80 °C) sta obrabljeni površini v povprečju za 50 % širši pri približno enaki dolžini (sliki 7 II a in 7 II b) v olju in raztopini G + V. Čeprav raze v vodi postanejo intenzivnejše, se širina obrabne kalote bistveno ne spremeni (slika 7 II c).



Slika 6 : Specifična obraba polimera v olju ISO VG46, raztopini glicerola in vode (G + V) ter demineralizirani vodi a) pri sobni temperaturi; b) pri povišani temperaturi



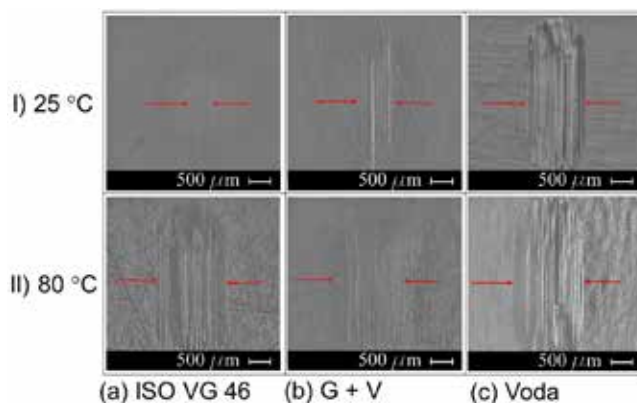
Slika 7 : Obrabne kalote ojačanega POM CF30 v a) olju ISO VG46, b) raztopini glicerola in vode (G + V); c) demineralizirani vodi I) pri sobni temperaturi; II) pri povišani temperaturi

Obrabna kalota POM (slika 8) je zelo podobna po obliki in velikosti ojačenemu POM CF30. Dolžina obrabne sledi ($\sim 3300 \mu\text{m}$) je podobna pri vseh mazivih in pri vseh testiranih pogojih. Najožja obrabna sled je bila opažena v olju pri sobni temperaturi ($\sim 823 \mu\text{m}$, slika 8 I a). Obrabna sled ni bistveno širša v raztopini G + V pri sobni temperaturi, čeprav so tudi tukaj opazne raze vzdolž smeri drsenja (slika 8 I b). V primeru čiste vode pri sobni temperaturi se je širina obrabe koloteka povečala ($\sim 66,5\%$ povečanje). Število in intenzivnost raz sta bistveno večja (slika 8 I c). Pri povišani temperaturi ni pomembne razlike v širini obrabne sledi med različnimi uporabljenimi mazivi ($\sim 1600 \mu\text{m}$, slika 8 II a-c). Vendar so raze vzdolž smeri drsenja manj globoke in intenzivne v raztopini G + V (slika 8 II b), v primerjavi z oljem (slika 8 II a) ali demineralizirano vodo (slika 8 II c). To se ujema z najmanjšo specifično obrabo v raztopini G + V pri povišani temperaturi in relativno majhnimi razlikami, izmerjenimi med mazivi.

4 Zaključek

V tej študiji smo analizirali prednost uporabe cenovno dostopnega inženirskega čistega polimera POM v primerjavi s polimerom, ojačanim z ogljikovimi vlakni (POM CF30). Preizkusi so bili opravljene v hidravličnem olju ISO VG 46, raztopini glicerola in vode (G + V) kot zelenega maziva ter v demineralizirani vodi kot najbolj razširjenem zelenem bazičnem mazivu. Preizkusi so bili izvedeni s parametri (hitrost, drsna pot, obremenitev, temperatura), ki ustrezajo drsnim vklopno-izklopnim ventilom in glede na omejitve eksperimentalne opreme.

V tej študiji smo preizkusili glicerol kot alternativo mazivo. Glicerol ima zelo visoko viskoznost, ki je nezaželena za hidravlične aplikacije, a jo je v vodni raztopini relativno lahko nadzorovati. V naših dosedanjih raziskavah smo preizkusili različne vo-



Slika 8 : Obrabne kalote POM v a) olju ISO VG46, b) raztopini glicerola in vode (G + V); c) demineralizirani vodi I) pri sobni temperaturi; II) pri povišani temperaturi

dne raztopine glicerola in našli ugodno razmerje za ohranjanje dobrih mazalnih lastnosti [30].

Rezultati študije kažejo nizke vrednosti koeficienta trenja POM CF30, ko se mešanica G + V uporablja kot mazivo, pri sobni temperaturi in povišani temperaturi. Vrednosti koeficienta trenja so bile podobne v raztopini G + V in v hidravličnem olju ISO VG 46. Pri sobni temperaturi je bil koeficient trenja v vodi do 6-krat višji kot v olju in raztopini G + V. Pri povišani temperaturi pa razlika ni bila očitna, čeprav je bila najmanjša vrednost izmerjena v raztopini G + V (0,03). Tudi specifična stopnja obrabe je bila nižja v raztopini G + V in hidravličnem olju, zlasti pri sobni temperaturi ($\sim 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$). Pri primerjavi raztopine G + V in hidravličnega olja z vodo kot mazivom smo izmerili za red velikosti večjo specifično stopnjo obrabe. Pri višjih temperaturah se je razlika med mazivi zmanjšala. Polarnost maziva in združljivost s testiranim polimerom je zelo pomemben vidik pri analizah. Absorpcija maziva lahko povzroči povečanje dejanske kontaktne površine, kar je posledica plastične deformacije polimera in zmanjšanja modula elastičnosti [31]. Zato je treba podrobneje raziskati interakcijo med polimerom in mazivi, zlasti pri različnih režimih obremenitve.

V primerjavi z meritvami čistega POM smo opazili podoben trend pri izmerjenih koeficientih trenja (vpliv vode kot maziva, vpliv višje temperature), vendar so bile na splošno izmerjene višje vrednosti koeficienta trenja za čisti POM kot za ojačani POM CF30. Nasprotno pa so bile opažene nižje vrednosti specifične obrabe za čisti POM v primerjavi z ojačanim POM CF30. Ta učinek je verjetno posledica dejstva, da v primeru ojačanega POM CF30 ogljikova vlakna nosijo večino obremenitve, hkrati pa stanjšanje ogljikovih vlaken povzroča poškodbo matrike POM CF30 in posledično višjo obrabo [20]. Vendar pa je za podrobnejšo razpravo o razliki potrebna nadaljnja elementarna ali spektroskopska analiza obrabnih površin.

Uporaba inženirskih polimerov bi potencialno omogočila lažje hidravlične komponente z odličnimi tribološkimi lastnostmi. Poleg tega bi v kombinaciji z novim tehnologijam 3D-tiska polimerov lahko razmeroma hitro prišli do izdelave in preizkusa novih prototipov. V naši nedavni študiji smo tribološko primerjali pet različnih polimernih kompozitov [20]. Med opazovanimi kompoziti je POM, ojačan s 30 % ogljikovih vlaken, uspešno sledil visoko zmogljivim PEEK-kompozitom. Na podlagi trenutnih meritev inženirski polimer POM kaže odlične tribološke rezultate tako v hidravličnem olju kot v raztopini G + V in ga je mogoče obravnavati kot potencialni material za hidravlične aplikacije, kjer se pričakujeta nizka obremenitev in visoka frekvenca.

Viri

- [1] Deaconescu T, Deaconescu A. Experimental Research on Polymer-Based Coaxial Sealing Systems of Hydraulic Cylinders for Small Displacement Velocities. *Polymers* 2022, Vol 14, Page 290 2022;14:290. <https://doi.org/10.3390/POLYM14020290>.
- [2] Friedrich K. Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 2018;1:3–39. <https://doi.org/10.1016/J.AIEPR.2018.05.001>.
- [3] Kurdi A, Chang L. Recent Advances in High Performance Polymers—Tribological Aspects. *Lubricants* 2019, Vol 7, Page 2 2018;7:2. <https://doi.org/10.3390/LUBRICANTS7010002>.
- [4] Matkovič S, Pogačnik A, Kalin M. Wear-coefficient analyses for polymer-gear life-time predictions: A critical appraisal of methodologies. *Wear* 2021;480–481:203944. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2021.203944>.
- [5] Stryczek J, Banaś M, Krawczyk J, Marciniak L, Stryczek P. The Fluid Power Elements and Systems Made of Plastics. *Procedia Eng* 2017;176:600–9. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.02.303>.
- [6] Marciniak L, Banaś M, Stryczek J. The Design and Theoretical and Experimental Study of the Plastic Hydraulic Valves. 9th FPNI PhD Symposium on Fluid Power, FPNI 2016 2016. <https://doi.org/10.1115/FPNI2016-1511>.
- [7] Li Y, Shang Y, Wan X, Jiao Z, Yu T. Design and experiment on light weight hydraulic cylinder made of carbon fiber reinforced polymer. *Compos Struct* 2022;291:115564. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.115564>.
- [8] Ellasswad M, Tayba A, Abdellatif A, Alfayad S, Khalil K. Development of lightweight hydraulic cylinder for humanoid robots applications. <https://doi.org/10.1177/0954406217731794>.
- [9] Panin S V., Alexenko VO, Buslovich DG. High Performance Polymer Composites: A Role of Transfer Films in Ensuring Tribological Properties—A Review†. *Polymers (Basel)* 2022;14:975. <https://doi.org/10.3390/POLYM14050975/S1>.
- [10] Siddiqui MSN, Pogacnik A, Kalin M. Influence of load, sliding speed and heat-sink volume on the tribological behaviour of polyoxymethylene (POM) sliding against steel. *Tribol Int* 2023;178:108029. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2022.108029>.
- [11] tribology-abc 2023. <https://www.tribology-abc.com/> (accessed August 3, 2023).
- [12] Lovrec D, Kalb R, Tič V. Ionic Hydraulic Fluids and Seal-Material Compatibility. *Applied Sciences* 2024;14:2187. <https://doi.org/10.3390/app14052187>.
- [13] Krawczyk J, Sobczyk A, Styczek J, Walczak P. Tests of New Methods of Manufacturing Elements for Water Hydraulics. *Materials Research Proceedings* 5, 2018, p. 200–5. <https://doi.org/10.21741/9781945291814-35>.
- [14] Yamamoto Y, Hashimoto M. Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts. *Wear* 2004;257:181–9. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.12.004>.
- [15] Yamamoto Y, Hashimoto M. Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts: Part 2. Composites with carbon or glass fibre. *Wear* 2004;257:181–9. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2003.12.004>.
- [16] Jain A, Somberg J, Emami N. Development and Characterization of Multi-Scale Carbon Reinforced PPS Composites for Tribological Applications. *Lubricants* 2019;7:34. <https://doi.org/10.3390/lubricants7040034>.
- [17] Xu H, Feng Z, Chen J, Zhou H. Tribological behavior of the carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide (PPS) composite coating under dry sliding and water lubrication. *Materials Science and Engineering: A* 2006;416:66–73. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.09.094>.
- [18] Zhang D, Qi H, Zhao F, Zhang G, Wang T, Wang Q. Tribological performance of PPS composites under diesel lubrication conditions. *Tribol Int* 2017;115:338–47. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.040>.
- [19] Golchin A, Friedrich K, Noll A, Prakash B. Tribological behavior of carbon-filled PPS composites in water lubricated contacts. *Wear* 2015;328–329:456–63. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.03.012>.
- [20] Trajkovski A, Novak N, Pustavrh J, Kalin M, Majdič F. Performance of Polymer Com-

- posites Lubricated with Glycerol and Water as Green Lubricants. *Applied Sciences* 2023;13:7413. <https://doi.org/10.3390/APP13137413>.
- [21] Deuster S, Schmitz K, Widomski K, Barnat-Hunek D, Musz-Pomorska A. Bio-Based Hydraulic Fluids and the Influence of Hydraulic Oil Viscosity on the Efficiency of Mobile Machinery Academic Editors: Marcin 2021. <https://doi.org/10.3390/su13147570>.
- [22] Hernández-Sierra MT, Bravo-Sánchez MG, Báez JE, Aguilera-Camacho LD, Santos García-Miranda J, Moreno KJ. Improvement Effect of Green Lubricants on the Tribological and Mechanical Performance of 4140 Steel n.d. <https://doi.org/10.3390/app9224896>.
- [23] Strmčnik E, Majdič F. Comparison of leakage level in water and oil hydraulics. *Advances in Mechanical Engineering* 2017;9:2017. <https://doi.org/10.1177/1687814017737723>.
- [24] Jeng Y-R, Tsai P-C, Chang C-M, Hsu K-F. materials Tribological Properties of Oil-in-Water Emulsion with Carbon Nanocapsule Additives n.d. <https://doi.org/10.3390/ma13245762>.
- [25] Zhang T, Liu C, Gu Y, Jérôme F. Glycerol in energy transportation: a state-of-the-art review. *Green Chemistry* 2021;23:7865-89. <https://doi.org/10.1039/D1GC02597J>.
- [26] Chen Z, Liu Y, Zhang S, Luo J. Controllable superlubricity of glycerol solution via environment humidity. *Langmuir* 2013;29:11924-30. <https://doi.org/10.1021/LA402422H>.
- [27] Liu C, Qiao Y, Lv B, Zhang T, Rao Z. Glycerol based binary solvent: Thermal properties study and its application in nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2020;112:104491. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2020.104491>.
- [28] Trejo González JA, Longinotti MP, Corti HR. The Viscosity of Glycerol-Water Mixtures Including the Supercooled Region. *J Chem Eng Data* 2011;56:1397-406. <https://doi.org/10.1021/JE101164Q>.
- [29] Somberg J, Saravanan P, Vadivel HS, Berglund K, Shi Y, Ukonsaari J, et al. Tribological characterisation of polymer composites for hydropower bearings: Experimentally developed versus commercial materials. *Tribol Int* 2021;162:107101. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2021.107101>.
- [30] Trajkovski A, Matkovič S, Novak N, Nadeem I, Kalin M, Majdič F. Glycerol aqueous solutions for the enhanced tribological behaviour of polymer composites sliding against steel. *Tribol Int* 2024;192:109173. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109173>.
- [31] Habchi W, Matta C, Joly-Pottuz L, De Barros MI, Martin JM, Vergne P. Full film, boundary lubrication and tribochemistry in steel circular contacts lubricated with glycerol. *Tribol Lett* 2011;42:351-8. <https://doi.org/10.1007/S11249-011-9778-6/FIGURES/6>.

Aadvantages of using engineering polymers for green (efficient) and sustainable hydraulic components

Abstract:

Engineering polymers have proven to have very promising tribological properties and successfully follow high-performance thermoplastics. In our research, we tested and analyzed polyoxymethylene (POM) for the very demanding operating conditions of hydraulic on/off valves. We tested POM and POM reinforced with 30 % carbon fiber (PO CF30) in standard ISO VG46 hydraulic oil, glycerol-water mixture and demineralized water at room and elevated temperatures.

The results showed a very low coefficient of friction (~ 0.027 - 0.033) and specific wear (~ 10^{-7} mm³/Nm) in the mixture of glycerol and water, comparable to the values measured in standard hydraulic oil and lower than those measured in water (coefficient of friction ~ 0.14, specific wear ~ 10^{-6} mm³/Nm), at room temperature. At elevated temperature, the coefficient of friction in hydraulic oil and glycerol-water mixture increased slightly, while in water decreased, measured values become comparable for all lubricants. The specific wear rate increased significantly in the hydraulic oil and glycerol-in-water mixture at elevated temperature and the values became comparable to the specific wear rates measured in water. Based on the results, both polyoxymethylene and glycerol-water mixture can be good and sustainable alternatives for standard hydraulic oil and steel tribological pairs, leading to excellent tribological properties with a significant reduction in component mass.

Keywords:

polymer, polyoxymethylene, glycerol, water, hydraulic oil, friction, wear, hydraulics