

Primerjava sistemov vodne in oljne pogonsko-krmilne hidravlike

Franc Majdič

Fakulteta za strojništvo Ljubljana

Jožef Pezdernik

Fakulteta za strojništvo Ljubljana

Mitjan Kalin

Fakulteta za strojništvo Ljubljana

Povzetek

Zmanjšanje zalog nafte in skoraj vsakodnevno spreminjanje njene cene sili svetovni razvoj na področju hidravličnih tekočin k iskanju in uporabi alternativnih virov. Na tem področju sta najbolj aktualni dve tekočini; ena je bio-razgradljivo hidravlično olje in druga je voda. Naše raziskave so naravnane k uporabi čiste vode (brez dodatkov) za hidravlično tekočino. Taka voda ne onesnažuje narave, je poceni, dobro razpoložljiva in negorljiva.

Prispevek uvodoma predstavlja pomembne razlike med hidravlično napravo z vodo brez dodatkov in analogno hidravlično napravo na mineralno hidravlično olje. V nadaljevanju bomo predstavili dvojno hidravlično preizkuševališče (čista voda / mineralno olje), planiran potek meritev na njem in nekaj dosedanjih izsledkov z drugega preizkuševališča glede triboloških lastnosti nekaterih preizkušenih materialov. Ker je preizkuševališče zelo kompleksno smo poleg funkcijske sheme izdelali tudi shemo cevnega razvoda. Ugotavljamo, da se tovrstne sheme v praksi redko izdelujejo, zato v prispevku podajamo tudi nekaj izkustvenih napotkov za izdelavo take sheme.

Zasnovali smo torej enostavno dvojno hidravlično preizkuševališče. Prvi del preizkuševališča uporablja čisto vodo, brez dodatkov kot hidravlično tekočino, drugi del preizkuševališča pa je zasnovan analogno kot prvi, le da za hidravlično tekočino uporablja mineralno olje. Namen preizkušanja je raziskava tribološkega in hidravličnega obnašanja vodnega in oljnega hidravličnega sistema.

1. Uvod

Veliko držav po vsem svetu posveča vedno več pozornosti varovanju okolja. Mi smo se v preteklosti pretežno ukvarjali z raziskavami na področju bio-razgradljivih tekočin [1 – 4] in njihovo uporabo v pogonsko-krmilni hidravliki [5]. Pri uporabi smo se posebej osredotočili na tiste delovne stroje, ki obratujejo na ekološko občutljivih območjih. Ker je potrebno bio-razgradljivim oljem dodati ustrezne dodatke, ki pa niso vedno razgradljivi, smo se odločili, da se pričenemo ukvarjati z raziskavami na področju vodne pogonsko-krmilne hidravlike (PKH). Ko omenimo vodno PKH imamo za hidravlično tekočino v mislih čisto vodo – brez dodatkov. Veliko sestavin vodne PKH je že razvitih in dostopnih na tržišču [6, 7, 8 in 9]. Na področju hidravličnih ventilov so v večji meri dostopni le krogelni oz. konusni sedežni tipi ventilov [6 in 7]. Taka izvedba ventilov je seveda ugodna z vidika notranjega puščanja, medtem ko je z vidika zveznega krmiljenja praktično neuporabna. Druga slaba stran sedežnega tipa potnega ventila je precej velika in zapletena konstrukcija.

Pri zamenjavi mineralnega olja z vodo je potrebno upoštevati ključne fizikalne in kemične razlike med tema dvema hidravličnima tekočinama. Voda se od mineralnega olja (ISO VG 46) pri 20°C razlikuje v približno 30 krat manjši kinematični viskoznosti, bistveno slabših mazalnih lastnostih, več kot 12 milijon-krat višjem uparjalnem tlaku (pri 50°C) in za 33 do 60 % višjem modulu stisljivosti (pri 20°C). Voda poleg naštetih stvari povzroča tudi rjavenje na delih, ki niso korozijsko odporni (večino sestavin oljne hidravlike).

Pri snovanju batnega drsniškega tipa ventila za vodno pogonsko-krmilno hidravliko smo na prvem mestu upoštevali bistveno manjšo viskoznost vode v primerjavi z mineralnim oljem. Trostmann [10] je ugotovil, da je potrebno zaradi omenjene manjše viskoznosti vode, če želimo obdržati podobno velikost notranjega puščanja znotraj ventila, režo med batom in pušo znižati za eno tretjino. Pri tem je potrebno vse ostale parametre, ki vplivajo na notranje puščanje, obdržati konstantne. Znižanje višine reže pa posledično zahteva bistveno ožje tolerance pri izdelavi krmilnega bata in puše potnega ventila. To pa v nadaljevanju, z upoštevanjem tanjšega mazalnega filma pri vodi v primerjavi z mineralnim oljem, povzroča zelo slabe pogoje v tribološkem kontaktu.

Višja energijska gostota pri pretakanju tlačnega medija – vode in višji uparjalni tlak vode, v primerjavi z mineralnim oljem, povzročata resne probleme erozije (pri kavitaciji) in abrazije, večjega notranjega puščanja in probleme pri delovanju ventila [10]. Nižja kinematična viskoznost pomeni tanjši mazalni film, kar lahko poveča trenje in obrabo. Temu se lahko izognemo, če uporabimo ustrezne materialne pare [11].

Dinamično obnašanje sistemov vodne PKH se razlikuje od obnašanja podobnega sistema oljne PKH v primeru zlasti manj dušenega nihanja, predvsem v višinah tlačnih amplitud in dolžinah period nihanja. Modul stisljivosti vode je okoli 30 % višji kot pri mineralnem olju. Rezultati izračuna hidravličnega udara po poznanem matematičnem modelu [12 in 13]

pokažejo za okoli 24 % višje tlačne amplitude pri sistemu vodne PKH v primerjavi s tistimi podobnem oljnem sistemu.

V nadaljevanju predstavljeno dvojno, vodno in oljno preizkuševališče bomo uporabili, da ugotovimo dejansko dinamično obnašanje, tribološke karakteristike in odpornost proti gibanju. Vodni del preizkuševališča smo zasnovali tako, da lahko preizkušamo različne materialne pare v preizkušancu (proporcionalni 4/3 potni ventil).

Izvedli smo preliminarne tribološke preizkuse na preizkuševališču "Pin-on-disc". Tu smo preizkusili obnašanje različnih triboloških parov v vodni kopeli. Predstavljeni rezultati preizkušanja pokažejo, da je najobetavnejši materialni par, če gledamo koeficient trenja in obrabo, z grafitom ojačan kompozit poly-eter-eter-keton (PEEK) proti keramiki alumini (Al_2O_3).

2. Opis preizkuševališča

2.1 Projektne zahteve

Preizkuševališče vodne pogonsko-krmilne hidravlike (PKH) mora biti preprosto, enostavno za nadziranje in, kar je najbolj pomembno, predstavljati mora realni hidravlični sistem. Omogočati mora:

- Merjenje tlakov, pretokov in temperatur pred in za glavnim preizkušancem, to je proporcionalnim potnim ventilom.
- Konstantni pretok skozi proporcionalni vodni potni ventil neodvisno od možnega zmanjšanja volumetričnega pretoka črpalke.
- Simulacijo obremenitev in kontrolo odziva.
- Spreminjanje obremenitev.
- Kontrolirano vrednost temperature vode (s hlajenjem).
- Popolnoma samodejni trajnostni test.
- Merjenje dinamičnega odziva sistema.
- Merjenje dinamičnega odziva preizkušanca – proporcionalnega vodnega potnega ventila.
- Enostavno merjenje notranjega puščanja preizkušanca - proporcionalnega vodnega potnega ventila.

2.2 Predstavitev vodnega hidravličnega preizkuševališča

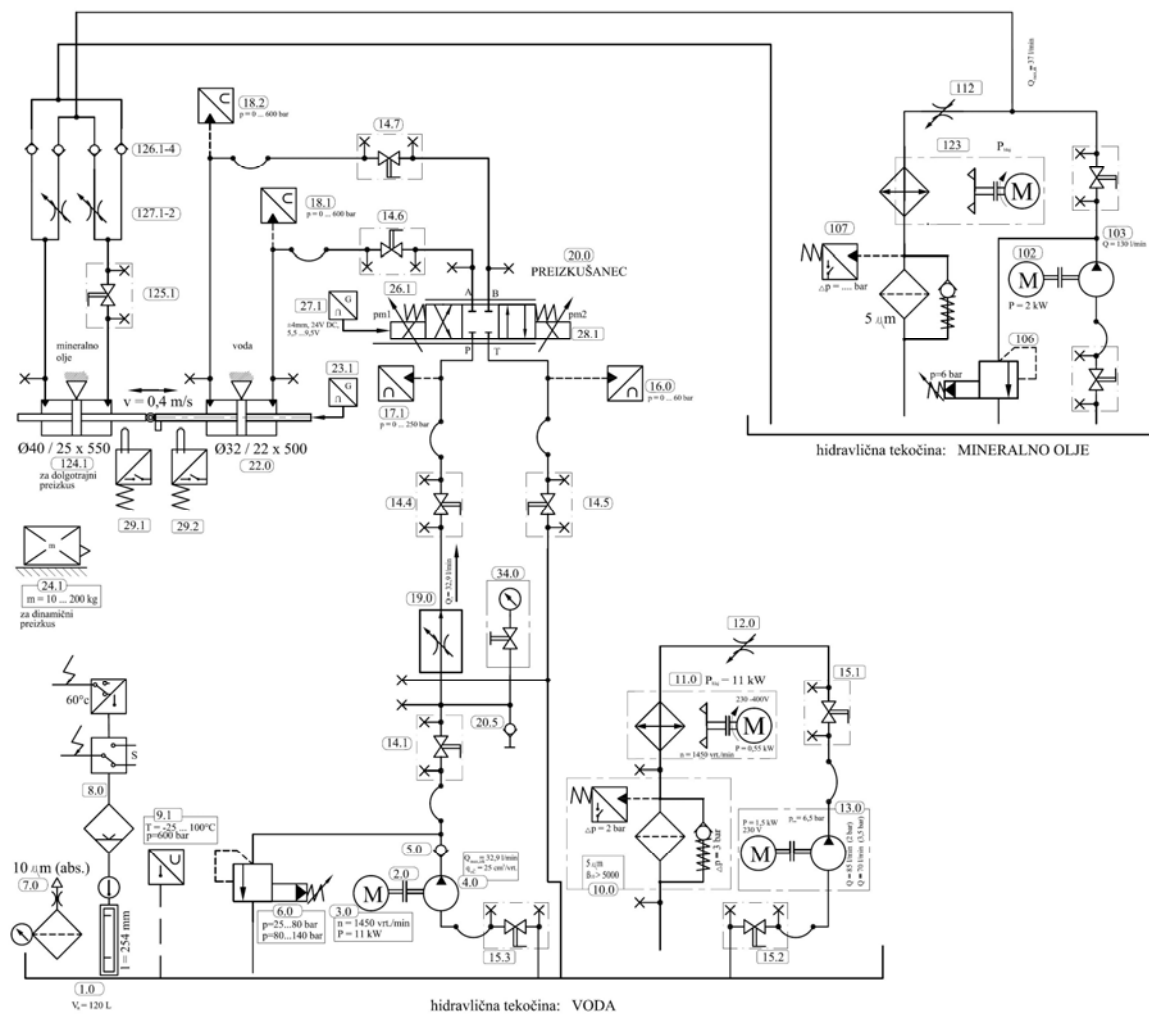
Zasnovali smo preizkuševališče vodne pogonsko-krmilne hidravlike (PKH), ki zadošča vsem projektnim zahtevam (poglavje 2.1). Slika 1 prikazuje hidravlično shemo našega preizkuševališča. Preizkuševališče sestavlja standardna Danfossova aksialna batna črpalka, tip PAH 25 (slika 1, poz. 4.0), s pretokom blizu 35 l/min [6] pri 1450 vrt./min in volumetričnim izkoristkom 97 %. Ta črpalka tlači vodo skozi tokovni ventil s tlačno kompenzacijo (slika 1, poz. 19). Tokovni ventil je nastavljen na konstantni pretok 30 l/min, ki teče skozi

preizkušanec (slika 1, poz. 20). Preizkušanec - proporcionalni tokovni ventil je krmiljen preko osebnega računalnika v zaprti zanki. Na priključku A omenjenega ventila sta dva T-kosa, krogelni ventil, 2,5 m dolga gibka cev, tlačno zaznavalo (sl. 1, poz. 18.1) in na koncu nerjavni hidravlični valj s skožno batnico (sl. 1, poz. 22). B priključek proporcionalnega vodnega ventila je z enakimi hidravličnimi sestavinami kot priključek A povezan z nerjavnim hidravličnim valjem z obojestransko batnico. Na kocu batnice je pri kratkotrajnih dinamičnih preizkusih pritrjena utež mase 162 kg. Ta utež je na kolesih, tako da je za gibanje potreben nizek delovni tlak. Za dolgotrajne teste, kjer bomo testirali vzdržljivost posameznih materialnih parov na obrabo ter iskali najustrežnejšega, pa bomo na konec batnice, kjer je bila prej masa, namestili drug oljni hidravlični valj (sl. 1, poz. 124.1).

S tem hidravličnim valjem bomo simulirali obremenitev z nastavitvijo dveh dušilno povratnih ventilov. Pretok bo pravilno, glede na gibanje batnice hidravličnega valja, usmerjen skozi dušilki s pomočjo štirih protipovratnih hidravličnih ventilov (sl.1, poz. 126). Hidravlična tekočina v tem delu tokokroga je mineralno olje. Ta del hidravličnega tokokroga ima svojo lastno obtočno črpalko (sl. 1, poz. 103), katera dobavlja del olja hidravličnemu valju, drugi del pa gre skozi zračni hladilnik in filter. Glavni namen te obtočne črpalke je dobava olja za hlajenje in filtriranje. Druga naloga te obtočne črpalke pa ni krmiljenje oz. pogon hidravličnega valja, ampak le zagotavljanje olja na vstopu v hidravlični valj, kajti ta valj je gnani od zunaj preko batnice vodnega hidravličnega valja z obojestransko batnico. Povratni pretok iz hidravličnega valja gre skozi zračni hladilnik in filter. Ta rešitev zagotavlja skoraj konstantne temperaturne pogoje hidravličnega olja v tokokrogu za simulacijo zunanjih obremenitev.

Sestavni sklopi krogelnega ventila in dveh T-kosov (sl.1, poz. 14.i in 15.i) so namenjeni za občasno kontrolo pretoka in temperature. Omenjeni sklopi so locirani na različnih mestih v hidravlični shemi. Vodni varnostni ventil je nastavljen na 160 bar. Za vzdrževanje konstantne temperature in obtočni način filtriranja uporabljamo centrifugalno vodno črpalko (sl.1, poz. 13).

Regulacija proporcionalnih magnetov (sl. 1, poz. 26.1 in 28.1), zajem podatkov in krmiljenje (vklopi \ izklopi) električnih motorjev je izvedeno samodejno s pomočjo osebnega računalnika.



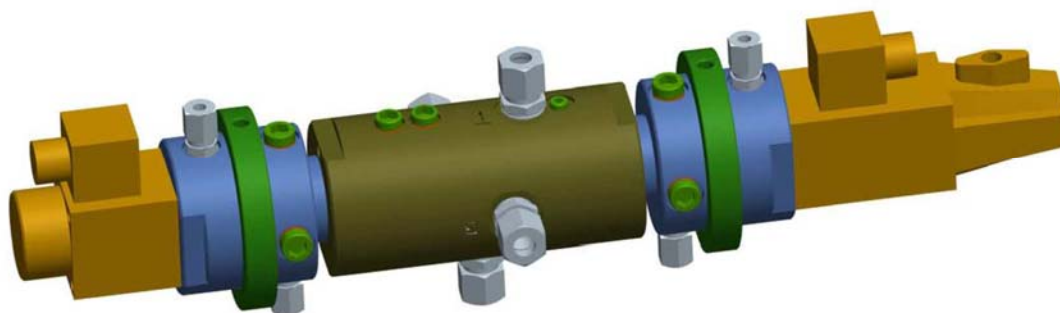
Slika 1: Funkcijska shema vodnega dela hidravličnega preizkuševališča

2.3 Snovanje proporcionalnega vodnega 4/3 potnega ventila

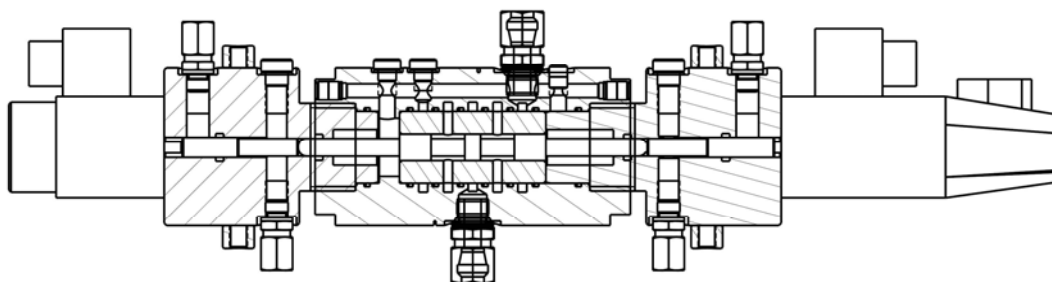
Sedežni tipi ventilov, izvedbe s konusom ali kroglico, niso primerni za zvezne ventile. To je razlog, da smo se odločili razviti proporcionalni vodni 4/3 potni drsniški ventil. Ta ventil bomo uporabljali v našem vodnem preizkuševališču za krmiljenje gibanja nerjavnega hidravličnega valja s skožnjo batnico.

Zaradi tribološko – hidravličnih raziskav smo zasnovali enostaven preizkušaneč – proporcionalni vodni 4/3 potni ventil (slika 2), pri katerem je preprosto zamenjati materialni par (bat/puša). Oblika in velikost preizkušanca omogočata hitro in enostavno površinsko analizo.

Glavni sestavni deli funkcionalnega prototipa proporcionalnega vodnega 4/3 potnega ventila (slika 3) so: drseči bat, puša, zunanje ohišje, vmesnika za proporcionalna magneta, dva proporcionalna magneta, eden je z merilnikom odmika (LVDT).

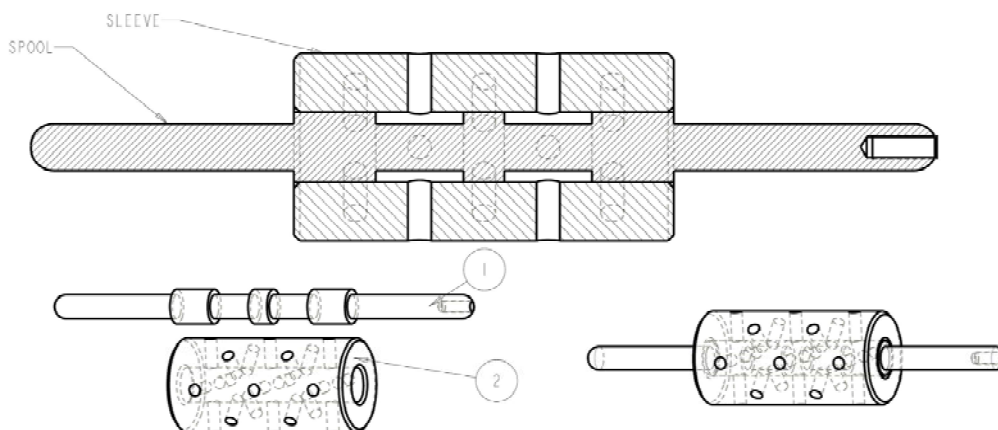


Slika 2: 3D model funkcionalnega prototipa proporcionalnega vodnega 4/3 potnega drsniškega ventila



Slika 3: Prerez funkcionalnega prototipa proporcionalnega vodnega 4/3 potnega drsniškega ventila

Glavna sestavna dela preizkušanca sta drsniški bat in puša (slika 4), katera sta geometrijsko preprosta ter enostavna za zamenjavo. Ta dva glavna sestavna dela sta zasnovana tako, da ju je enostavno izdelati, tudi iz posebnih materialov, kot je npr. keramika.



Slika 4: Glavna sestavna dela preizkušanca – materialni par: 1 ... bat, 2 ... puša

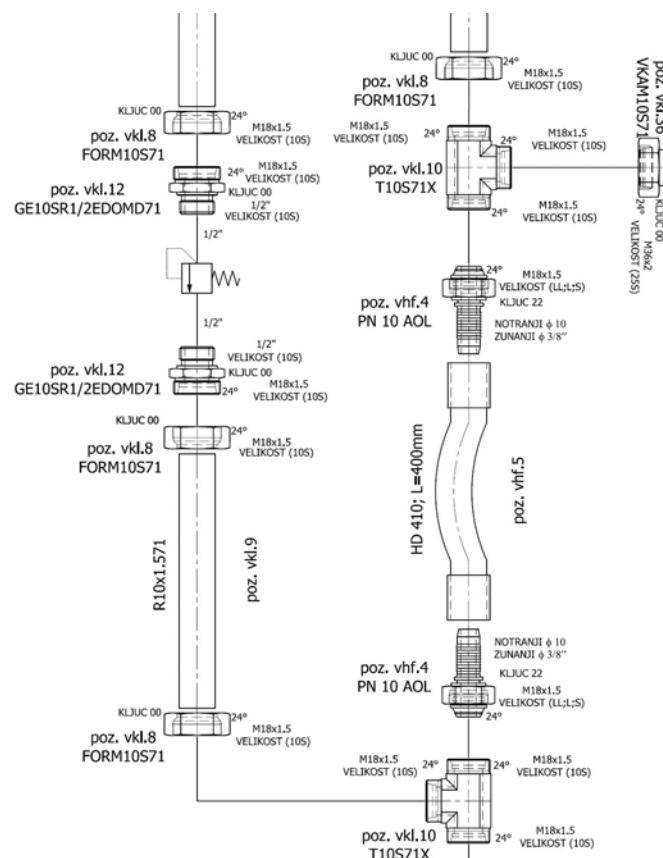
2.4 Snovanje cevnega hidravličnega razvoda

Iz funkcijske hidravlične sheme polovice preizkuševališča – vodni del (sl. 1) je razvidno, da ima naše preizkuševališče obsežen cevni razvod z mnogo cevni priključki. To narekuje izdelavo risbe cevnega razvoda preizkuševališča, kar bi bilo priporočeno za vsak projekt

hidravlike. Snovanje cevnega razvoda zahteva poznavanje navojev, različnih izvedb tesnjenja, velikostnih razredov cevnih priključkov, ...

- *Navoji:* V hidravliki se v Evropi najbolj uporabljajo: metrični (M) in cevni (G) navoji. Poleg cilindrične izvedbe navojev se izdelujejo tudi konični navoji. Poleg omenjenih navojev se uporabljajo še navoji NTS, ...
- *Izvedbe tesnjenja:* V Evropi se najbolj uporablja tesnjenje s 24° konusom, po možnosti z vmesnim elastičnim elementom (O-obroč, zarezni prstan s tesnilom, ...). Kovinski stik in uporaba bakrenih podložk se opušta. Za spoje jeklenih cevi se pri enostavnih hidravličnih napravah v največji meri uporablja zarezni prstan, medtem ko se pri industrijskih hidravličnih napravah uporabljajo naprave za hladno-deformiranje jeklenih cevi – izdelava posebnih cevnih priključkov. Poleg izvedbe tesnjenja s 24° konusom se uporablja še prirobnično tesnjenje (črpalke), 90° tesnjenje ("O-lok"), ...
- *Velikostni razredi cevnih priključkov:* obstajajo zelo lahka izvedba (oznaka LL – nizki tlaki), lahka izvedba (oznaka L – srednje visoki tlaki) in težka izvedba (oznaka S – visoki tlaki).

Pri vodnem delu preizkuševališča smo uporabili nerjavne priključke in nerjavne cevi, največ iz materiala W. Nr. 1.4371 ali na kratko z oznako 71. Pri nerjavnih cevnih priključkih smo imeli veliko problemov, ker se malo uporabljajo, je njihov dobavni rok zelo dolg, oz. določenih ni mogoče dobiti. Prisiljeni smo bili, da za več cevnih priključkov narišemo delavniške risbe in jih damo izdelati. Na sliki 5 je prikazan manjši del risbe vodnega dela cevnega razvoda. Tej sestavni risbi seveda sledi še kosovnica, ki je potrebna za naročilo in montažo.



Slika 5: Del risbe cevnega razvoda vodnega dela preizkuševališča

3. Tribološki preizkus različnih materialnih parov

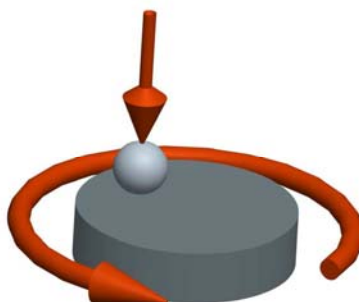
Z namenom raziskav obrabe in uporabne dobe pri poznanih hidravličnih parametrih za predstavljen preizkušanelec (poglavje 2.3) smo izvedli preliminarne tribološke preizkuse za različne možne materialne pare (sl. 4). S tem lahko izberemo za nas najprimernejše in jih uporabimo na realnem hidravličnem preizkuševališču. V splošnem je v vodni hidravliki najbolj uporabljeno nerjavno jeklo (SS), ki je v primerjavi z drugimi alternativnimi materiali tudi cenovno najugodnejše. Druge potencialne skupine materialov so keramika in polimeri. Ker je keramika v splošnem zelo draga in ima zelo nizko žilavost, je ne smatramo kot najuporabnejši material za preizkuse na realnem hidravličnem preizkuševališču. Kljub temu smo jo preizkusili in primerjali z drugimi materiali. Zato iz keramike nismo izdelali diska (kar je priporočeno za material, ki ga želiš detajlno preizkusiti); keramiko smo v teh omenjenih pred-preizkusih uporabili zgolj za primerjavo. Uporabili smo keramično kroglico, ki nam da nekaj indikacij kako se keramika obnaša v tribološkem kontaktu z drugim materialom. Uporabili smo tudi nekaj različnih, na tržišču dostopnih polimerov. Izbrali smo tiste, ki so bili v preteklosti že uporabljeni v vodi in so dali obetajoče tribološke rezultate [14 – 16]. Iz dveh različnih skupin polimerov; poli-eter-eter-eton (PEEK) in poli-imid (PI); smo izbrali dva različna tipa materialov. Komercialno dostopen PEEK (Viktrex Europa GmbH, Nemčija) vsebuje 30 % ogljikovih (oznaka CA30) in 30 % steklenih (oznaka GL) vlaken. Iz skupine poli-imidov (Vespel iz Dupoint™) smo za prvi vzorec uporabili čisti poli-imid brez dodatkov (oznaka SP1) in za drugi vzorec poli-imid z 15 % ogljikovimi vlakni (oznaka SP21).

Tribološke teste smo izvedli na testerju "Pin-on-disc" (CSEM, Švica) z enosmernim drsenjem trna s sferičnim koncem (oz. kroglice) po vrtečem se disku (slika 6).



Slika 6: "Pin-on-disc" naprava

Relativna drsna hitrost je bila 0,1 m/s, obremenitev pa 1N (slika 7), kar odgovarja 40 – 70 MPa kontaktnega tlaka, ki je odvisen od materialnega para. V dostopni literaturi [14-16] so podani rezultati nekaterih izbranih polimernih materialov pri nizkih tlakih. Mi smo za razliko od omenjenih meritev, preizkušali pri visokih tlakih – zgornji nivo za polimerne materiale. V preizkusu je vsak materialni par drsel 370 m. Vsi preizkusi so bili izvedeni v destilirani vodi pri temperaturi okoli 21°C. To so pogoji za mejno mazanje, kjer je hidrodinamični efekt zanemarljiv. Tribološke razmere v kontaktu so odvisne predvsem od razmer na površini in mejnih ploskvah. Med preizkušanjem smo merili trenje, medtem ko se je obraba diska računala kasneje. Prvi empirični rezultati trenja in obrabe so predstavljeni na sliki 8 in 9.

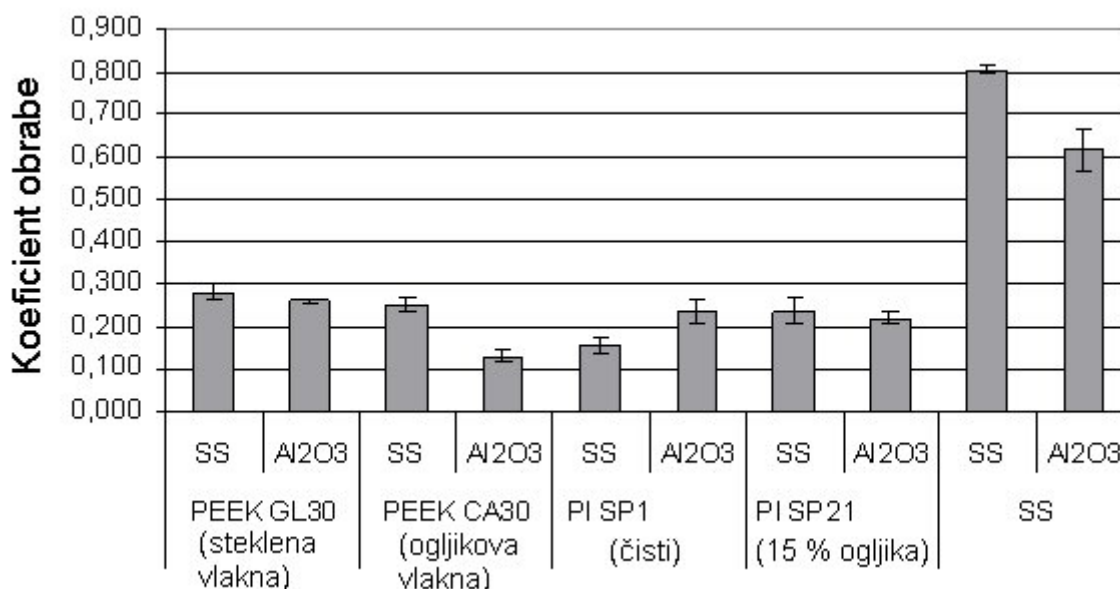


Slika 7: Funkcijski princip tribološke "Pin-on-disk" naprave, mazivo: destilirana voda

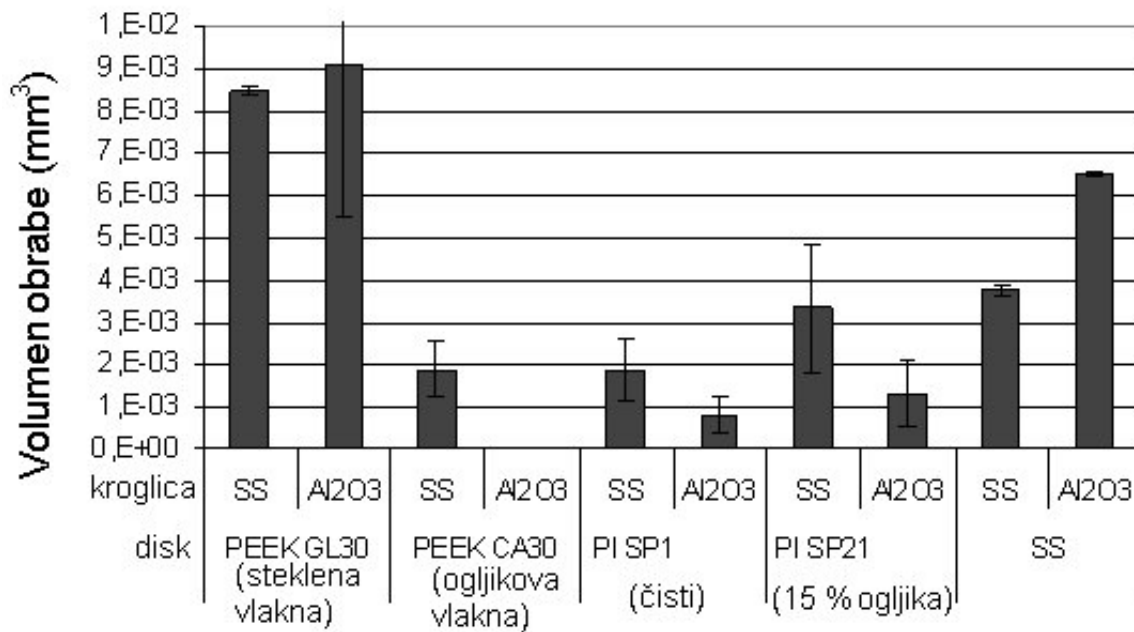
Material za kroglico sta bila v tribološkem pred-preizkusu: *nerjavno jeklo* SS (S105CrMo17, trn s sferičnim kontaktnim delom, kar je enakovredno kroglici) s trdoto 55Hrc in *alumina* (keramika: Al_2O_3 ; 99,7 % čistoča; kroglica $\Phi 10$ mm). Skupaj smo uporabili štiri različne polimere in nerjavno jeklo za materiale testnih diskov proti dvema različnima trnoma. Preglednica 1 predstavlja izbrane kombinacije testiranih materialnih parov.

Preglednica 1: Materialni pari uporabljeni v preliminarnem tribološkem preizkusu

Material diska	Material trna 1	Material trna 2
PEEK 30% steklenih vlaken (GL30)	Nerjavno jeklo (SS)	Alumina (Al_2O_3)
PEEK 30% ogljikovih vlaken (CA30)	Nerjavno jeklo (SS)	Alumina (Al_2O_3)
PI – čisti – brez dodatkov (SP1)	Nerjavno jeklo (SS)	Alumina (Al_2O_3)
PI z 15% grafita (SP21)	Nerjavno jeklo (SS)	Alumina (Al_2O_3)
Nerjavno jeklo (SS)	Nerjavno jeklo (SS)	Alumina (Al_2O_3)



Slika 8: Koeficient obrabe za izbrane materiale (različni materiali diskov proti dvema različnima kroglicama)



Slika 9: Obraba za izbrane materiale
(različni materiali diskov proti dvema različnima kroglicama)

Koeficient trenja (slika 8) je bil pri vseh polimerih (disk) proti nerjavnemu jeklu (kroglica oz. trn) bistveno nižji kot pri nerjavnem jeklu (disk) proti nerjavnemu jeklu (kroglica oz. trn), kjer je bil koeficient med 0,6 in 0,8. Pri ostalih materialih se je koeficient trenja nahajal med 0,13 in 0,28, kar je za 2 do 3 krat manj kot pri nerjavnem disku. Pri vseh materialih diska, razen pri čistem poli-imidu, je bil koeficient trenja nižji, ko smo uporabili kroglico iz alumine (keramika), v primerjavi s koeficientom trenja s trnom iz nerjavnega jekla. Te razlike niso zelo velike. Vendar je pri tem potrebno poudariti, da je trenje pri kontaktu materialnega para SP1/SS zelo majhno, drugo najnižje od vseh testiranih. To je pomembno, ker ta polimer ne vsebuje nobenih dodatkov in je zaradi tega tudi cenovno ugoden. Iz praktičnega vidika je trn nerjavnega jekla (SS) pomemben material, katerega želimo opazovati. V kombinaciji s trnom iz nerjavnega jekla je bilo najnižje trenje pri disku iz čistega poli-imida. Najnižje trenje v teh preliminarnih triboloških raziskavah, koeficient trenja je bil 0,13, smo zabeležili pri materialnem paru PEEK CA30 / Al₂O₃.

V povezavi z koeficientom trenja smo merili tudi obrabo. Pri disku iz PEEK CA30 proti kroglici iz Al₂O₃ z našo merilno tehniko (merjenje po principu "stylus" z resolucijo okoli 50 nm v z osi) nismo zaznali nobene obrabe. Ta kombinacija je po tej tribološki raziskavi najbolj obetavna. Majhno obrabo proti kroglici iz Al₂O₃ smo zaznali še pri diskih iz PI SP1 in PI SP21. Razumno nizko obrabo v kontaktu s trnom iz nerjavnega jekla smo zaznali pri diskih iz: PEEK CA30, PI SP1 in PI SP21. Na drugi strani smo dobili najslabše rezultate – največjo obrabo pri disku iz nerjavnega jekla (SS) in disku iz PEEK GL30. Obraba omenjenih diskov je bila še posebej izrazita v kombinaciji z kroglico iz alumine (Al₂O₃), kar je nasprotno kot obraba diskov PEEK CA30, PI SP1 in PI SP21 proti alumini (Al₂O₃).

4. Kratek povzetek in zaključni sklepi

- Zasnovo je bilo enostavno dvojno preizkuševališče za raziskavo hidravličnega in tribološkega obnašanja sistema vodne in oljne pogonsko-krmilne hidravlike. Zasnovan je bil funkcionalni prototip 4/3 proporcionalnega potnega ventila za vodo. Določeni so testni pogoji, materiali in geometrijski parametri preizkušanca in preizkuševališča. Preizkuševališče omogoča testiranje različnih hidravličnih, krmilnih, dinamičnih in triboloških lastnosti izbranega sistema.
- Izdelali smo preliminarne tribološke teste za raziskavo in določitev ustreznih materialnih parov za nadaljnjo uporabo in testiranje v realnem vodnem 4/3 proporcionalnem potnem (drsniškem) ventilu.
- Najnižji koeficient trenja smo zasledili pri kontaktu PEEK CA30 / Al₂O₃. Drug zanimiv materialni par z nizkim koeficientom trenja je PI SP1 / SS, ker ga je lažje izdelati in je cenovno ugodnejši.
- Najnižja obraba se je pojavila v istem materialnem paru kot najnižji koeficient trenja, to je pri kontaktu PEEK CA30 / Al₂O₃.

5. Zahvala

- Za vso podporo pri teh raziskavah se zahvaljujemo *prof. dr. Jožetu Vižintinu*, vodji Centra za tribologijo, tehnično diagnostiko in hidravliko (CTDH).
- Avtorji smo za finančno in tehnično podporo iskreno hvaležni slovenski firmi *Tajfun Planina d.o.o.*, največjemu proizvajalcu gozdarske opreme v Evropi.
- Za finančno podporo pri teh raziskavah smo hvaležni *Slovenski Raziskovalni Agenciji (ARRS)*.
- Večji del sestavin oljne hidravlike je prispevalo podjetje *Kladivar Žiri d.d.*, vodilni proizvajalec hidravličnih sestavin v Sloveniji. Za to se jim zahvaljujemo.
- Za delno donacijo hidravličnih gibkih cevi se zahvaljujemo firmi *HIB Kranj*.

6. Literatura

- [1] M. Kalin, J. Vižintin, A comparison of the tribological behaviour of steel/steel, steel/DLC and DLC/DLC contact when lubricated with mineral and biodegradable oils. *Wear* 261 [1] (2006) 22-31.
- [2] J. Barriga, M. Kalin, K. Van Acker, K. Vercammen, A. Ortega, L. Leiaristi. Tribological performance of titanium doped and pure DLC coatings combined with a synthetic bio-lubricant. *Wear* 261 [1] (2006) 9-14.
- [3] Kalin, M., Vižintin, J., Vercammen, K., Arnšek, A., Barriga, J., Van Acker, K. Tribological performance of lubricated DLC coatings using biodegradable oils. *The coatings in Manufacturing Engineering* (2004) 457-465.
- [4] J. Barriga, M. Kalin, K. Van Acker, K. Vercammen, A. Ortega, L. Leiaristi. Tribological characterisation and validation of carbon based coatings combined with bio-lubricants. *Proceedings of the 11th Nordic Symposium on Tribology*. Norway, June 2004. Pg. 508-517.

- [5] M. Kalin, F. Majdič, J. Vižintin, J. Pezdirnik. Performance of axial piston pump using DLC-coated piston shoes and biodegradable oil. in: The 12th Nordic Symposium on Tribology, Helsingor, Denmark, June 7-9, 2006. Nordtrib 2006. (2006), 10 Pgs.
- [6] Nessie – Sauer Danfos: <http://nessie.danfoss.com/>
- [7] Tiefenbach Wasserhydraulik GmbH: <http://www.ft-tiefenbach.de/>
- [8] Water Hydraulics Lth: www.waterhydraulics.co.uk
- [9] Hauhinco Maschinenfabrik G. Hausherr, Jochums GmbH & Co. KG: www.hauhinco.de
- [10] E. Trostmann: WATER HYDRAULICS CONTROL TECHNOLOGY; Lyngby 1996, Technical University of Denmark; ISBN: 0-8247-9680-2
- [11] Y. Huayong, J. Sujuan, G. Guofang, Z. Hua: Investigation on the tribological properties of new materials and its application in water hydraulic piston pump, SICFP'05, Linköping, Sweden, 2005
- [12] J. Pezdirnik, F. Majdič, Transient Phenomena in Gradual Changes of Hydraulic Fluid Flow, 5. IFK, Aachen, 2006,
- [13] J. Pezdirnik: Prehodni pojavi pri hidravličnih napravah v železarstvu (Transient Phenomena in Ironworks Hydraulic Systems), M. Sc. Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana 1984
- [14] Y. Yamamoto, T. Takashima, Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts, Wear 253 (2002) 820-826.
- [15] Y. Yamamoto, T. Takashima, Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts Part 2. Composites with carbon or glass fibre, Wear 253 (2002) 820-826.
- [16] J.P. Davim, N. Marques, A.M. Baptista, Effect of carbon fibre reinforcement in the frictional behaviour of Peek in a water lubricated environment, Wear 251 (2001) 1100-1104.