

Hidraulički sustavi s vodom kao medijem

Hlupić, Slavko

Undergraduate thesis / Završni rad

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:340843>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
Prof. dr. sc. Joško Petrić

Slavko Hlupić

Zagreb, 2011.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Slavko Hlupić

Zagreb, 2011.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **SLAVKO HLUPIĆ**

Mat. br.: 0035162772

Naslov rada na hrvatskom jeziku:

HIDRAULIČKI SUSTAVI S VODOM KAO MEDIJEM

Naslov rada na engleskom jeziku:

WATER HYDRAULIC SYSTEMS

Opis zadatka:

Medij prijenosa energije u hidrauličkim sustavima može biti i voda. Prednosti vode u odnosu na tradicionalno mineralno ulje su višestruke, a osnovne su nezapaljivost i ekološka prikladnost. Međutim korištenje vode ima i važnih nedostataka. Osnovni principi djelovanja hidraulike su jednaki, no pojedina različita svojstva medija čine i značajne razlike između vodne u uljne hidraulike. U zadatku je potrebno detaljno analizirati upotrebu vode kao medija za prijenos energije u hidrauličkim sustavima i usporediti takve sustave s onima koji koriste ulje.

Zadatak zadan:
18. studenog 2010.

Rok predaje rada:
1. rok: **04. veljače 2011.**
2. rok: **05 srpnja 2011.**

Rok predaje rada:
1. rok: **09.-11. veljače 2011.**
2. rok: **11.-13. srpnja 2011.**

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Joško Petrić

Prof. dr. sc. Dubravko Majetić

SAŽETAK

U ovom je radu najprije dan kratak opis korištenja vode u hidrauličkim sustavima. Ujedno su predstavljene prednosti i nedostaci korištenja vode u hidrauličkim sustavima. Predstavljene su sve važne karakteristike strujanja fluida u hidrauličkim sustavima, te je uspoređeno korištenje vode i ulja u sustavima. U radu su također opisane mogućnosti korištenja vode u hidrauličkim sustavima, te su navedeni primjeri korištenja. Predstavljene su neki od poznatijih proizvođača opreme za vodenu hidrauliku te su predstavljene mogućnosti komponenti. Na kraju su priloženi riješeni primjeri hidrauličkih sustava u kojima se koristi ulje i voda kao medij. Iz njih se vide bitne razlike između korištenja vode i ulja.

Ključne riječi: voda kao medij u hidrauličkim sustavima; vodena hidraulika; primjena vode u hidraulici

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Općenito o hidraulici	2
2.1. Vrste fluida i njihov izbor	2
2.2. Hidraulika s vodom kao medijem	3
3. Svojstva fluida	11
3.1. Gustoća fluida	11
3.2. Modul elastičnosti	12
3.3. Toplinska svojstva fluida	14
3.3.1. Koeficijent toplinske ekspanzije	14
3.3.2. Toplinska vodljivost	16
3.3.3. Specifični toplinski kapacitet	17
3.4. Viskoznost fluida	17
3.5. Tlak para	20
3.6. Kemijska svojstva	21
3.7. Strujanje fluida	22
3.7.1. Reynoldsov broj	22
3.7.2. Bernoullijeva jednažba protoka i jednažba otvora	22
3.7.3. Poiseuilleov zakon	23
3.7.4. Jednažba prstenastog propuštanja	24
3.8. Gubici tekućine	24
3.9. Prijelazne pojave	28
3.9.1. Strujanje kroz hidrauličke cijevi	28
3.9.2. Nedimenzionalne jednažbe	29
3.9.3. Hidraulički udar (vodeni čekić)	30
3.10. Podmazivanje	31
4. Primjeri i mogućnosti primjene hidraulike s vodom kao medijem	33
5. Proizvođači opreme za hidrauliku s vodom kao medijem	35
6. Zaključak	40
7. Literatura	41
8. Prilog	42

POPIS SLIKA

Slika 3.1	Krivulja naprezanje-deformacija; prikazana je sekanta modula elastičnosti K i tangenta modula elastičnosti β	12
Slika 3.2	Fleksibilni spremnik pod tlakom	13
Slika 3.3	Odnos između koordinatnog sustava, smjera toplinskog toka, gradijenta temperature u jednoj dimenziji	16
Slika 3.4	Shematski prikaz posmične deformacije unutar fluida	18
Slika 3.5	Promjena viskoznosti mineralnih ulja u odnosu na promjenu temperature	19
Slika 3.6	Promjena dinamičke viskoznosti s promjenom temperature	19
Slika 3.7	Promjena dinamičke viskoznosti u odnosu na promjenu temperature i tlaka	20
Slika 3.8	Strujanje visokim Reynoldsovim brojem kroz otvor	22
Slika 3.9	Koeficijenti kontrakcije određeni eksperimentalno za različite geometrije prolaza	23
Slika 3.10	Protok kroz kružni presjek niskim Reynoldsovim brojem	23
Slika 3.11	Shematski put prstenastog curenja	24
Slika 3.12	Moodyev dijagram	25
Slika 3.13	Koeficijenti gubitaka za slučaj ulaza u cijev	25
Slika 3.14	Koeficijent gubitaka kod zaobljenih rubova	26
Slika 3.15	Koeficijenti gubitaka za slučaj izlaska iz cijevi	26
Slika 3.16	Koeficijenti gubitaka za slučaj naglog proširenja cijevi	27
Slika 3.17	Koeficijenti gubitaka kod cijevnog luka	28
Slika 3.18	Analiza kontrolnog volumena za hidrauličke cijevi	28
Slika 3.19	Nagla promjena brzine stupca tekućine (vodeni čekić)	30
Slika 3.20	Podmazivanje nakošenog jastuka ležaja	31
Slika 4.1	Kläggen, Švedska – sustav upravljanja segmentnim zatvaračima za kontrolu razine jezera	34
Slika 4.2	Naussac, Francuska – sustav upravljanja glavnim zatvaračem dovoda vode na turbinu i lopatice privodnog kola	34
Slika 4.3	Ottendorf, Germany - zaštitna vrata za punjenje i pražnjenje odvodnog kanala	34
Slika 4.4	Bångbro, Sweden - kontrola dovoda vode na turbinu	34

POPIS TABLICA

Tablica 3.1	Gustoća fluida korištenih u hidrauličkim sustavima kod 20°C	11
Tablica 3.2	Modul elastičnosti fluida K_0 i m	12
Tablica 3.3	Mehanička svojstva za materijale spremnika	13
Tablica 3.4	Volumenski koeficijent toplinske ekspanzije tekućina koje se koriste unutar hidrauličkih sustava	15
Tablica 3.5	Volumenski koeficijent toplinske ekspanzije materijala koji se obično koriste za hidrauličkih sustava	15
Tablica 3.6	Vrijednosti toplinske vodljivosti k	16
Tablica 3.7	Specifični toplinski kapacitet c_p	17
Tablica 3.8	Vrijednosti koeficijenta dinamičkog viskoziteta	18
Tablica 3.9	Tipični koeficijenti gubitaka u hidrauličkim sustavima	27

POPIS OZNAKA

Oznaka Opis

K -sekanta modula elastičnosti

Re -Reynoldsov broj

β -tangenta modula elastičnosti

POPIS FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Opis	Jedinica
A	-površina	m ²
c	-brzina zvuka	m/s
C _c	-koeficijent kontrakcije	-
C _d	-koeficijent pražnjenja	-
c _v , c _p	-specifični toplinski kapacitet (konst. volumen i tlak)	kJ/(kg K)
E	-modul elastičnosti čvrstih materijala	N/mm ²
F	-sila	N
h	-entalpija	J/kg
k	-toplinska vodljivost	W/(mK)
KE	-kinetička energija	J
K _L	-koeficijent gubitaka	-
K ₀	-modul elastičnosti fluida	N/mm ²
l	-duljina	m
M	-masa	kg
m	-nagib rasta	
P	-tlak	Pa
PE	-potencijalna energija	J
R	-univerzalna plinska konstanta	J/(kgK)
T	-temperatura	K
vv	-brzina	m/s
V	-volumen	m ³
Q	-protok fluida	m ³ /s
αα	-koeficijent toplinske ekspanzije	1/K
ββ	-modul elastičnosti tekućina	N/mm ²
μ, η	-dinamička viskoznost	Pa s
υυ	-kinematička viskoznost	St
ρρ	-gustoća	kg/m ³
ττ	-posmično naprezanje tekućine	N/mm ²

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

IZJAVA

Pod punom moralnom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu, te znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, sveučilišta u Zagrebu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Jošku Petriću, voditelju ovog rada na pruženoj stručnoj pomoći i na savjetima za najbolji put izrade ovog rada.

Zagreb, 2011.

1. UVOD

Hidraulika je danas veoma raširena u industriji. Gotovo nema područja na kojem se ne koristi. Samim time je i velika količina hidrauličnog ulja koja se nalazi u sustavima. Hidraulički sustavi ponekad procure, te se ulje razlije u svoju okolinu. Često nakon toga završi u prirodi, a u slučaju da se približi plamenu ili vrućim dijelovima strojeva veoma se laganu zapali. To su najveći nedostaci hidrauličkih ulja, te je stoga počela ponovna upotreba vode kao medija u hidrauličkim sustavima. Ponovno, stoga što je voda postojala prije pronalaska nafte i koristila se za prenošenje energije mnogo prije nego su proizvedena mineralna ulja. Voda savršeno otklanja navedene nedostatke ulja. Najvažnija prednost je što nije štetna za okoliš a isto nije ni zapaljiva.

Hidraulika s vodom kao medijem ili skraćeno nazvana vodena hidraulika se prema principu rada ne razlikuje značajno od hidraulike koja koristi ulje kao medij. U počecima korištenja vode u hidrauličkim sustavima javljali su se mnogu problemi koji su ograničavali korištenje. Zatim se pojavilo ulje koje je imalo niz prednosti nad vodom, te je razvoj komponenti za rad s vodom jednostavno zaustavljen. Danas postoji cjeli niz potpuno novih komponenti koje su razvijene isključivo za korištenje vode, te su karakteristike drastično poboljšane. Stoga, danas vodena hidraulika po svojstvima ne zaostaje za uljnom.

Vodena hidraulika ima najveću primjenu na branama i ustavima te na off-shore platformama. Prije svega koristi se gdje postoji opasnost od izlivanja velike količine ulja u prirodu ili postoji velika opasnost od požara.

Vodena hidraulika je dostigla uljnu hidrauliku i danas može u potpunosti konkurirati. Kako svijest o okolišu postaje sve veća, tako i rastu troškovi zbrinjavanja ulja, te vodena hidraulika postaje konkurentna i cijenom. Hidraulički sustav s vodom je u početku višestruko skuplji od istog sustava s uljem, ali kod korištenja vode iz slavine nema više gotovo nikakvih troškova vezanih uz zbrinjavanje tekućine i njezinu nabavu.

Samim time je budućnost vodene hidraulike veoma dobra, te bi se voda mogla ponovno vratiti na vrh upotrebe u hidrauličkim sustavima.

U ovom radu ću pokušati približiti korištenje vodene hidraulike te nju usporediti s uljnom. Rad je podijeljen na pet cjelina.

U **drugom poglavlju** su predstavljene vrste fluida koje se primjenjuju u hidraulici. Nakon toga je detaljnije opisano korištenje vode u hidraulici. Objasnjene su prednosti i nedostaci korištenja vode te zahtjevi koje traže takvi sustavi.

U **trećem poglavlju** su opisana svojstva karakteristična za medije u hidrauličkim sustavima. Ujedno je kod svakog svojstva prikazana usporedba vodene i uljne hidraulike.

U **četvrtom poglavlju** su navedeni primjeri korištenja vodene hidraulike. Navedeni su neki od prvih primjera korištenja te budućnost primjene vode u hidraulici.

U **petom poglavlju** su navedeni neki od poznatijih proizvođača opreme za vodenu hidrauliku. Ujedno su predstavljeni i njihovi proizvodi.

Kao **prilog** su dodani riješeni zadaci iz hidraulike. U njima su kao medij uzeti ulje i voda, te je vidljiva razlika u radu sustava kada se koristi voda umjesto ulja.

2. OPĆENITO O HIDRAULICI

2.1. VRSTE FLUIDA I NJIHOV IZBOR

Danas se u hidrauličnim sustavima koristi nekoliko vrsta tekućina. Najviše se koriste fluidi na bazi nafte ili mineralna ulja. Zbog sve veće svijesti o zaštiti okoliša sve se više koriste fluidi koji nisu štetni za okoliš. To su biorazgradiva ulja koja se najčešće izrađuju od biljnih ulja te voda koja pomalo osvaja tržište. Zanimljivo je i da se voda prva koristila u hidrauličkim sustavima, ali tada se pojavila nafta koja je preuzela primat. Skupine tekućina koje se koriste u hidraulici su sljedeće:

Fluidi na bazi nafte

Ulja na bazi nafte su najčešće tekućine korištene u hidrauličkim sustavima. One su kompleksna smjesa ugljikovodika koja mora biti rafinirana u tekućinu odgovarajućih svojstava pogodnih za rad u hidrauličkim sustavima. Ovim tekućinama se dodaju različite skupine aditiva. Aditivi uključuju inhibitore protiv pjenjenja, oksidacije i korozije. Aditivi se mogu koristiti za povećanje indeksa viskoznosti i poboljšanje mazivih svojstava tekućine. Ova ulja se nazivaju i mineralna ulja.

Sintetičke tekućine

Sintetičke tekućine se koriste kao protupožarna alternativa mineralnim uljima. Nazivaju se po baznim uljima. Primjeri takvih ulja su fosfatni esteri i silikatni esteri. Ova ulja imaju puno bolja svojstva od mineralnih, ali su skuplja. Sintetičko ulje se dobiva u kemijskim laboratorijima gdje inženjeri slažu molekule da dobe željena svojstva.

Biorazgradivi fluidi

Biorazgradivost je sposobnost nekih tvari da se razgrade na ne toksične tvari pomoću živih mikroorganizama. Zbog zaštite okoliša, biorazgradive tekućine su postale važna alternativa za upotrebu u hidrauličkim sustavima. To je posebno značajno u mobilnoj hidraulici, gdje nenamjerno izljevanje može rezultirati dugoročnim oštećenjem tla i voda u blizini izljevanja. Za korištenje su dostupni različiti tipovi biorazgradivih tekućina. Većinom se kao baza biorazgradivih ulja koriste biljna ulja, posebno ona iz uljane repice. Ostale biorazgradive tekućine s višim karakteristikama su na bazi sintetičkih ulja. Ona pružaju puno bolje radne karakteristike, ali su jako skupe, što ograničava njihovu upotrebu.

Voda

Vodena hidraulika je tema razgovora mnogih inženjera kod projektiranja sustava. Razlozi za to su očiti. Voda je dostupna u gotovo neograničenim količinama, te je stoga jeftina. Voda također nije štetna za okoliš, a time se ublažuje zabrinutost od onečišćenje u slučaju kvara hidrauličkih sustava ili izljevanja. S druge strane, voda ima nekoliko nedostataka. Podržava razvoj bakterija. Taj razvoj uzrokuje onečišćenje tekućine unutar sustava što može dovesti do kvara sustava. Još jedan nedostatak je što je temperaturno radno područje prilično usko. Voda se smrzava na 0°C a vrije na 100°C (pri atmosferskom tlaku). Voda također raspolaže sa lošim mazivim svojstvima te niskom viskoznošću. Nedostatak je isto što je voda korozivna za većinu materijala od kojih se izrađuju hidraulički sustavi. Da bi se voda koristila kao hidraulički medij, dijelovi hidrauličnog sustava moraju biti prevučeni polimernom prevlakom.

Izbor fluida

Prilikom izbora hidrauličnog medija moramo razmišljati o sljedećim karakteristikama:

1. Tekućina mora biti kompatibilna s materijalima koji se koriste za hidrauličke komponente i mora imati dobru mazivost.
2. Tekućina mora posjedovati visoki indeks viskoznosti kroz široki raspon temperatura.
3. Tekućina mora biti dugog životnog vijeka (barem 5000 sati). To znači da mora biti stabilna prema toplini, vlazi, oksidaciji i smicanju.
4. Tekućina mora biti u skladu s ekološkim zahtjevima.
5. Tekućina mora imati visok modul elastičnosti, za zadovoljavajući dinamički odziv hidrauličnog sustava. Općenito, to znači da se tekućina mora oduprijeti apsorpciji zraka i

- pokazivati nisku sklonost pjenjenju.
6. Tekućina mora biti niske cijene i lako pristupačna.
 7. Tekućina mora pokazivati otpornost na zapaljivost.
 8. Tekućina mora pokazivati visoku toplinsku vodljivost zbog odvođenja topline iz sustava.
 9. Tekućine moraju posjedovati niski tlak para i visoku temperaturu isparavanja kako bi se izbjegla kavitacija.

2.2. HIDRAULIKA S VODOM KAO MEDIJEM

Prednosti vode kao hidrauličke tekućine prepoznate su gotovo na početku hidrauličke znanosti. Međutim, razvoj komponenti visokih performansi zahtijevao je u ranom 20. stoljeću prelazak na tekućine na osnovi nafte. Taj je događaj zajedno s pojavom umjetne gume izgurao vodenu hidrauliku u pozadinu kroz veći dio 20. stoljeća.

Potkraj stoljeća je ipak došlo do oživljavanja vodene hidraulike. To je bilo potaknuto uglavnom zaštitom okoliša i zaštitom od požara. Sve je omogućio razvoj novih materijala, pumpi i ventila. Ovaj napredak omogućio je inženjerima da iskoriste prednosti vode.

Uloga vode u hidraulici

Ništa u prirodi nije toliko povezano s čistoćom i svježinom kao voda. Voda također igra veliku ulogu kao moćan medij. Prije 20. stoljeća je služila kao medij za hidrauličko gibanje. Sada, gospodarski i ekološki utjecaji ponovno pomažu vodi vratiti značaj kao hidraulički medij. Njezino svojstvo čistoće, u kombinaciji s dugom povijesnom upotrebom kao izvora energije, vodu je gurnulo natrag na vrh hidrauličkih tekućina. Bilo korištena u svom čistom obliku ili pomiješana s uljima i aditivima, voda se sve više doživljava kao alternativa konvencionalnim hidrauličkim tekućinama. Kao rezultat toga, inženjeri su vodu svrstali u obnovljive medije. Mnogi sad prepoznaju da je ekološka, nezapaljiva, jeftina, čista, lako dostupna i može se koristiti za jednokratnu upotrebu.

Tko danas koristi vodu u hidraulici?

Vodena hidraulika se koristi u tvrtkama, koje moraju zadovoljiti neke uvijete:

- smanjenje opasnosti od požara
- smanjenje troškova poslovanja
- zamijeniti velike količine konvencionalne tekućine
- zbog zabrinutosti zajednice i državnih propisa glede zaštite okoliša

Prednosti vodene hidraulike

Manji troškovi vode

Malo stvari je dostupnijih i obilnijih od vode. Kao rezultat toga, troškovi vode su samo dio troškova konvencionalnih hidrauličkih tekućinama. Operativni troškovi su niži. Troškovi skladištenja i prijevoza ne postoje. A kada se koriste aditivi i koncentрати, njihovi troškovi su minimalni jer se koriste u malim količinama.

Smanjenje sigurnosnih opasnosti

Tekućine na bazi vode su otporne na vatru. Čista voda je nezapaljiva. Kad sustavi zahtijevaju aditive, smjesa obično dijeli svojstva čiste vode. Voda također povećava sigurnost na drugi način. Radnici ne udišu štetne uljne pare i smanjen je rizik izloženosti kože i očiju.

Niži troškovi osiguranja

Voda je netoksična i nezapaljiva. Tako zapravo vodeni hidraulički sustavi mogu smanjiti industrijske premije osiguranja.

Laka dostupnost

Voda je široko dostupna u cijelom industrijaliziranom svijetu. Nasuprot tome, konvencionalne hidrauličke tekućine, uključujući i biorazgradiva ulja, ovise o kapacitetima proizvođača. Kao rezultat toga, troškovi mogu rasti kao reakcija na tržište ponude i potražnje.

Manji troškovi zbrinjavanja

Zakonodavstvo je promijenilo praksu zbrinjavanja tekućina. Hidrauličke tekućine moraju se zbrinjavati i odlagati na propisani način, čak i proizvodi koji nose oznaku biorazgradivi i ne otrovni. Troškovi zbrinjavanja mogu biti znatni. No s vodom kao hidrauličkom tekućinom, troškovi odlaganja su smanjeni ili čak i eliminirani.

Manji troškovi zaštite okoliša

Zakonodavstvo će i dalje tvrtke smatrati odgovornima za zaštitu okoliša. Za tvrtke koje ne ispunjavaju standarde, porez na zaštitu okoliša i druge odgovornosti vjerojatno će se povećavati. No za tvrtke koje zadovoljavaju standarde, troškovi će se vjerojatno smanjivati. Korištenje vode u hidraulici čini sklad lakšim i jeftinijim.

Smanjenje zagađenja proizvoda

Zagađenje proizvoda je briga za mnoge industrije. Onečišćenost sprječava tekstilnu i drvenu industriju u izboru boja. Također obojeni papir mijenja farmaceutske proizvode i uzrokuje nepoželjni okus kod hrane. Zagađenje također može spriječiti prodaju nekih proizvoda. Korištenje odabranih tekućina, čak i onih definiranih kao ne otrovnih i ekološki prihvatljivih, ne znači da će riješiti probleme. Međutim, ako voda dospije u proizvod, smatra se da je manje štetna.

Poboljšanje zelene slike

Korištenje vodene hidraulike potiče kod građana sliku dobre korporacije. Korisnici vodene hidraulike obično imaju sljedeće razloge: svjesni su troškova, osjetljivi su na okoliš i brinu o pitanjima sigurnosti.

Ispunjavanje zahtijeva vodene hidraulike

Tehnološki napredak oblikuje temelje današnjih sustava hidraulike s vodom kao medijem. Glavni tehnički izazovi, uključujući i propuštanje i koroziju, riješeni su vrlo uspješno. S novim vrstama ventila, brtvi i pumpi, inženjeri su upregnuli sve svojstvene prednosti vode kao hidrauličnog medija.

Propuštanje

Voda ima nisku viskoznost, te je teška kontrola vanjskih i unutarnjih propuštanja.

Rješenje:

Sustavi su posebno dizajnirani za korištenje vode. Smanjene su tolerancije dosjeda i koriste se materijali koji su otporni na koroziju. Uz uvođenje novih materijala, kao što su keramika i polimeri, komponente su projektirane kako bi se smanjilo unutarnje propuštanje smanjenjem razmaka i trošenja.

Erozija

Voda ima nižu viskoznost i veću specifičnu težinu što može rezultirati većim brzinama i turbulentnim strujanjem. Visoka brzina i turbulencija mogu nagrizzati metalne površine.

Rješenje:

Današnji hidraulički sustavi konstruirani su za vodu niske viskoznosti. Komponentama s programiranim utorima, rupama i zarezima, u kombinaciji s kontrolom brzine, može se smanjiti šok i uglađen rad sustava. Ventili sa sjedištima, posebni materijali i premazi, te novorazvijene brtve čine borbu protiv erozije uspješnom.

Korozija

Kisik i sumpor nusproizvodi su bakterija od kojih mogu korodirati materijali nekih komponenti.

Rješenje:

Nehrđajući materijali, kao što su nehrđajući čelik, bronca ili posebno obrađeni aluminij, mogu spriječiti koroziju. Inženjeri također sprječavaju koroziju korištenjem staklenih vlakana, keramike, plastike, PVC-a i drugih sintetičkih materijala. Aditivi također doprinose borbi protiv korozije premazivanjem površina koje imaju potencijal da korodiraju.

Temperatura

Operativna temperatura vode kao tekućine u hidrauličnim sustavima ograničena je na raspon od 2°C do oko 50°C, ovisno o komponentama koje se koriste.

Rješenje:

U slučajevima mogućeg zamrzavanja, koristi se zagrijavanje sustava na minimalnoj temperaturi. Za sustave koji su izloženi zamrzavanju, može se koristiti dodatak antifrizu. Budući da definicija biološke razgradivosti još nije univerzalna, izbor antifrizu je veoma važan. Dobar odabir će osigurati da se ne uništi primarni razlog odabira vode kao medija.

Rast bakterija:

Kada spremnik ima kontakt s vanjskim okolišem i održava se u normalnim radnim temperaturama, može pružiti plodno tlo za razvoj svih vrsta mikroorganizama. To može dovesti do začepjenja filtra i ventila, te do neugodnog mirisa.

Rješenje:

Kontrola bakterija može se postići:

- izlaganjem vode ultraljubičastom svjetlu
- pasterizacijom vode
- dodavanjem biotrova
- odzračivanjem spremnika s finim filtrima protiv mikroorganizama
- filtracijom

Zatvoreni spremnici također mogu spriječiti rast bakterija. Zatvoreni od vanjskog zraka i onečišćenja, ovi sustavi se mogu koristiti dugi niz godina bez promjene medija.

Hidraulički udar

Hidraulički udar se događa kada se tekućina naglo zaustavi, obično uzrokovano brzim zatvaranjem ventila.

Rješenje:

Pravilnim osmišljavanjem sustava i izborom komponenti, hidraulički udar ili "vodeni čekić" može biti gotovo eliminiran. Ventili dizajnirani za kontrolirano pomicanje mogu pružiti precizno ubrzanje ili usporenje tekućine. Primjena akumulatora može smanjiti krutost sustava. Veličina akumulatora ovisi o radnom tlaku sustava.

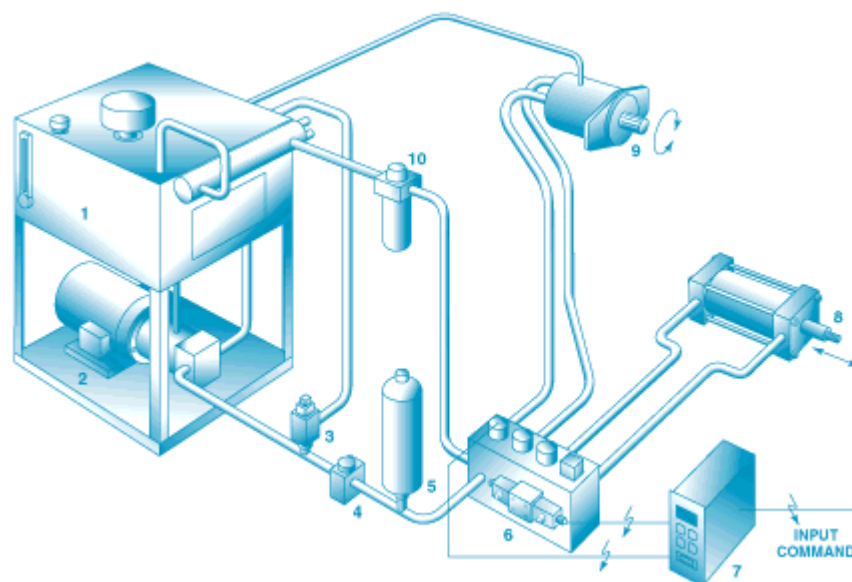
Podmazivanje

Voda je male mazivosti i može dovesti do povećanog kontaktnog trenja i trošenja dijelova.

Rješenje:

Konvencionalne komponente zahtijevaju podmazivanje. Korištenjem komponenta koje sadrže prevlake ili su izrađene od posebnih materijala, voda se ponaša kao mazivo. Aditivi također mogu poboljšati maziva svojstva.

Komponente hidrauličkih sustava s vodom



Hidraulički sustavi s vodom koriste sve osnovne vrste komponenti kao i kod konvencionalnih sustava, pumpe, motori, cilindri, ventili, filtri i akumulatori. Međutim, ove komponente su dizajnirane da izdrže zahtjevnije uvijete koje je izazvalo uvođenje vode. Posebni materijali, nehrđajući čelik, keramika te razni polimeri, kombinirani sa strožim tolerancijama daju komponente koje performansama odgovaraju konvencionalnim komponentama.

Dijelovi:

- 1) Rezervoar
- 2) Pumpa s elektromotorom
- 3) Nepovratni i sigurnosni ventil
- 4) Tlačni ventil
- 5) Akumulator
- 6) Višestruki ventil
- 7) Elektronička kontrolna kartica
- 8) Cilindar
- 9) Hidraulični motor
- 10) Povratni filtar

Cilindri

Cilindri pretvaraju gibanje tekućine za prijenos snage u linearno gibanje i silu. Cilindri koji se koriste u vodenoj hidraulici su izrađeni od posebnih materijala, kao što su nehrđajući čelici ili od materijala s posebnim premazima i tretmanima, tako da se mogu suprotstaviti eroziji i djelovanju vode.

Filtri

Filtri uklanjaju strane materijale iz tekućine. Zahtjevi kod vode u hidrauličnim sustavima su slični onima kod uljne hidraulike, ali materijali filtra moraju biti kompatibilni s vodom. Za tijelo filtra se najčešće koriste staklena vlakna, dok se kućišta filtra, izmjenjivači topline i grijani elementi obično izrađuju od nehrđajućih čelika.

Motori

Hidraulički motori proizvode okretni moment kada tekućina pod tlakom ulazi u njih. Inovativni dizajn nastoji poboljšati motore koji se koriste u vodenoj hidraulici. Motori koji su posebno dizajnirani za korištenje vode iz slavine, koriste samo vodu za podmazivanje. Da bi se smanjili gubici propuštanja, konstruirani su s malim razmacima između dijelova i koriste se posebne brtve.

Pumpe

Pumpe pretvaraju mehaničku energiju u gibanje tekućine. Nova tehnološka dostignuća su proširila vrste voda koje se danas koriste. Dostupne su aksijalne i radijalne klipne pumpe.

Spremnici

Spremnici pohranjuju tekućinu sustava. Obično su izrađeni od nehrđajućih čelika, plastike ili metala prevučenih s materijalima otpornih na koroziju. Spremnici obično trebaju biti veći od onih u konvencionalnih sustavima.

Brtve

Brtve sprječavaju curenje medija. No u hidrauličnim sustavima s vodom, one podmazuju dijelove, jer su maziva svojstva vode mala. Samopodmazujuće brtve dostupne su s različitim tipovima brtvi od elastomera.

Ventili

Ventili kontroliraju smjer i protok fluida. Konvencionalni ventili su dostupni u širokom rasponu konfiguracija. Ventili su obično izrađeni od nehrđajućih čelika ili keramike zbog otpornosti na koroziju i smanjenja trošenja. Kućišta ventila mogu biti izrađena od nehrđajućih čelika ili anodiziranog aluminija.

Rad s vodom

Pravila projektiranja sustava

Pravilno projektiranje sustava nudi dugoročnu sigurnost i bitan je faktor za postizanje najboljih performansi, pouzdanosti i operativnih troškova. Moraju biti određene karakteristike sustava te se moraju uskladiti s karakteristikama komponenti.

Budući da voda ima različita svojstva od ulja, nekoliko faktora se mora uzeti u obzir prilikom dimenzioniranja sustava.

Stlačivost

Voda je kruta, što nju čini idealnom za sustave s visokom frekvencijom pogona. Njezina kompresibilnost je za oko pola manja od ulja. To se pokazuje manjim dekompresijskim udarom, što rezultira manjim gubitkom energije u sustavu.

Viskoznost

Voda je niske viskoznosti što omogućuje lakši protok. Zbog toga se može generirati protok s više energije koji u nekim slučajevima može uzrokovati eroziju. Voda niske viskoznosti također dopušta da protok lakše prolazi kroz male otvore.

Ostala svojstva

Voda ima relativno visoku specifičnu toplinu i koeficijent toplinske vodljivosti, tako da je potreban manji koeficijent hlađenja za sustave s vodom nego s uljem kao medijem.

Voda ima veći tlak para, tako da postoji veći rizik od kavitacije. Ali, koristeći dobro isplanirani sustav koji slijedi nekoliko osnovnih pravila, zajedno s pravilima oblika komponenti, može pomoći

sprječavanju potencijalne štete od kavitacija.

Voda je također odličan vodič električne energije, pa se posebna pažnja mora posvetiti sprječavanju mogućih električnih udara. Elektronika vezana na ventile i ostale komponente stoga treba koristiti odgovarajući hardver.

Komponente moraju biti projektirane koristeći pravilne materijale, premaze, te toplinske obrade, kako bi se spriječila erozija, korozija curenje i kavitacija. Spremnici moraju biti većih dimenzija, kako bi mjehurići zraka imali više vremena da izađu iz tekućine, i da se smanji onečišćenje mikroorganizama. Pumpe moraju biti opskrbljene pozitivnim ulaznim tlakom. Priključci i vodovi moraju biti veći da se smanji brzina strujanja kako bi se spriječilo turbulentno strujanje, kavitacija i erozija.

Tekućine se odabiru tako da osiguravaju sigurnu interakciju s proizvodima, kako bi se spriječilo bojanje, smrzavanje, ključanje, isparavanje i uzgoj bakterija.

Ispravni odabir materijala

Pravilan odabir materijala u hidrauličkim sustavima s vodom je jako bitan. Za morsku vodu, koja je osobito agresivan medij, pravilan izbor materijala je osobito važan.

Neki hidraulički sustavi koriste inertne, obložene ili korozijski otporne materijale. Budući da se može pojaviti galvanska korozija prilikom kontakta vode s određenim materijalima, treba i na to obratiti pažnju kod konstruiranja.

Niska mazivost vode može u nekim slučajevima ostvariti kontakt metal na metal. Niska mazivost i velike brzine, također doprinose potrebi za korištenjem keramike i polimera na mjestima kontakta. Korištenje keramike na kontaktima može poboljšati karakteristike zbog keramičke otpornosti na eroziju, kavitaciju, koroziju i trenje.

Održavanje

Kao i kod svih hidrauličkih sustava, važan je dobar postupak održavanja. Kada se koristi voda ili tekućine na bazi vode, tekućine treba redovito pratiti. Trebale bi se vršiti jednostavne kontrole u pogledu izgleda, razrijeđenost pH vrijednosti, mikrobiološko stanje te tvrdoća vode.

Vrste tekućina na bazi vode

Tekućine na bazi vode su klasificirane kao vatrootporne tekućine. Dijele se u sljedeće skupine:

Prirodna voda	Tretirana prirodna voda	Voda s dodacima
Voda iz slavine	Demineralizirana voda	HFA = HWCF = HWBF
Obradena voda	Deionizirana voda	HFA-E (emulzija ulja i vode)
Morska voda	Desalinizirana voda	HFA-M (mikro emulzija) HFA-S (sintetičko riješenje) HFB (voda u ulju ili inverzna emulzija) HFC (voda s antifrizom)

HFA tekućine imaju maksimalno 20% zapaljivih tekućina. Nominalno, 80% vode i 20% aditiva, ali u praksi aditivi obično zauzimaju 5% volumena. Postoje aditivi gotovo za svaku vrstu primjene, od kojih neki zadovoljavaju i najstrože ekološke zahtjeve.

HFB tekućine su inverzne emulzije koje sadrže više ulja nego vode. One se rijetko koriste izvan rudarstva.

HFC su vodeni polimeri s najmanje 35% vode. Vodeni antifrizi obično ulaze u ovu grupu, a obično se sastoje i do 50% vode.

Korištenje aditiva

Iako su danas neke kompanije u stanju koristiti čistu vodu, mnogi sustavi koriste mali postotak aditiva. Aditivi se obično sastoje od mineralnih ulja zajedno s emulgatorima i različitim inhibitorima (korozije, parne faze, protiv pjenjenja itd.). Antifrizi se također koriste u mnogim sustavima. Aditivi se odabiru na temelju utjecaja na okoliš i higijenskih utjecaja, tako da svojstva vode nisu izgubljena.

Karakteristike vode

Brzina

U teoriji, aplikacije koje zahtijevaju brze odzive mogu imati koristi od vode kao medija. Razlozi tome su što je voda manje stlačiva. To znači da je manje vremena potrebno za komprimiranje fluida. Niska stlačivost također znači da kontrole brzo prenose promjene opterećenja. Budući da je većina sustava unutar uobičajenih hidrauličnih tlakova, dobici na brzini su zanemarivi. Ipak, svojstvena brzina vodene hidraulike čini nju kandidatom za sustave gdje se traže velike brzine odziva. Vodena hidraulika se može koristiti u zahtjevnim sustavima, visoke frekvencije, kao što su robotika i simulatori leta.

Ušteda energije

Voda je niže viskoznosti što znači da ima manji otpor strujanja. To dovodi do manje toplinske energije i gubitaka topline.

Voda daje velike energetske uštede u sustavima manje snage. Ventili i vodovi također mogu biti manji, što zahtijeva manje materijala.

Proporcionalna kontrola

Prvi razmjerno kontrolirani sustavi s vodom već postoje. Ovi sustavi omogućuju korisnicima točnu kontrolu tlaka i sile. Da bi to bilo ostvareno, trebalo je riješiti problem s električnom vodljivosti vode, tako da se uspješno mogu koristiti servo i proporcionalni ventili. Razvijene su keramički svitci u ventilima. Proporcionalna kontrola se postiže kroz upotrebu zatvorene petlje.

Tlakovi

Hidraulički sustavi s vodom se obično koriste na jednakom tlakovima kao i drugi sustavi. Oni također nude i veliku gustoću tlaka, koji je razlog zašto se već dugo koriste u velikim sustavima, kao što su velike preše i valjaonice. Velika sila koju omogućuju hidraulički sustavi na bazi vode omogućila je da se koriste u rezanju dijamanata, kristala i drugih tvrdim materijala.

Napredak u vodenoj hidraulici

Uvođenjem novih tehnologija i dizajnom novih materijala, kao što su keramika, polimeri, metalni premazi i mase za izravnavanje, promijenilo se lice vodene hidraulike. Fluorpolimerne prevlake pružaju zaštitu od korozije bez poroznosti. Ti premazi također pružaju mehaničku žilavost, otpornost na habanje i samo podmazivanje.

Nove tekućine i aditivi također igraju ključnu ulogu u povratku vodene hidraulike. Današnje tekućine pružaju bolju mazivost, smanjuje trošenja, trenja, turbulencije i toplinskih gubitaka.

Projektiranje sustava

Kako se korištenje vodene hidraulike povećava, očekuje se smanjenje troškova. Spuštanjem

početnih troškova deseti će se proboj vodene hidraulike, čime će se moći primijeniti na još više strojeva.

Projektiranje komponenti

U posljednjih nekoliko godina inženjeri su razvili nove komponente koje mogu koristiti čak i morsku vodu kao medij. U rotacijskim komponentama je omogućeno postizanje većih brzina s većom djelotvornošću. Novorazvijene aksijalno klipne pumpe i motori nude bolji omjer snage i težine u usporedbi s uljnom hidraulikom.

Novi ventili uključuju potpuno keramičke svitke i kućišta. Smanjenje toplinske ekspanzije keramičkih materijala omogućuje uže tolerancije.

Servoventili, osmišljeni kako bi točno kontrolirali tlak vode kao hidrauličke tekućine, odgovaraju karakteristikama i učinkovitosti uljnih servoventila.

Kontrolna elektronika

Hidraulički proporcionalni sustav kontrole vode, koji je uveden u posljednja dva desetljeća, pronašao je primjenu u tvornicama čelika i aluminija, u kojima se koriste velike preše. Sustavi ventila su obično upravljani električnim karticama koje se temelje na analognoj tehnici. U novije vrijeme se ugrađuje mikroprocesorsko upravljanje.

Budućnost vodene hidraulike

Rastuća briga o okolišu dovela je do ponovnog interesa za vodenu hidrauliku. Svojstvena čistoća i sigurnost vode oslobađa projektante od utjecaja nafte, zapaljivosti i sigurnosti radnika. U isto vrijeme, impresivna svojstva vode kao medija dovele su toj tehnologiji sve veću primjenu. Kako bi se zadovoljila potražnja za tehnološkim napretkom, inženjeri su konstruirali nove preciznije, brže i izdržljivije komponente. Ventili i tehnologija kontrole se i dalje usavršava. Proizvođači komponenti za vodenu hidrauliku su također usmjerili napore prema razvoju komponenti za male hidrauličke sustave.

Čak i sada, mnogi korisnici uviđaju prednosti vodene hidraulike. Čistoća i niski operativni troškovi čine vodenu hidrauliku održivim energetske medijem.

Cijenom pristupačna, pouzdana i čista, vodena hidraulika igra sve veću ulogu u svjetskoj industrijskoj sceni.

3. SVOJSTVA FLUIDA

3.1. GUSTOĆA FLUIDA

Gustoća fluida ovisi o tlaku i temperaturi. Za mnoge tvari jednadžba je složena i teško točno opisuje stanje. Jednadžba stanja idealnog plina je primjer jednostavne jednadžbe. U ovom slučaju se zakon idealnog plina koristi za određivanje plinske konstante. Iz toga slijedi

$$\rho = \frac{P}{RT} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (3.1)$$

Gdje je ρ gustoća plina, T je apsolutna temperatura (Kelvin), P je apsolutni tlak plina i R je univerzalna plinska konstanta koja je specifična za svaki plin. Nažalost, za slučaj tekućina jednadžba nije tako jednostavna. Međutim, s obzirom da su tekućine prilično nestlačive, može se pretpostaviti da se gustoća tekućine neće značajno mijenjati promjenom temperature i tlaka.

Jednadžba za tekućine glasi:

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \frac{1}{\beta_0} (P - P_0) - \alpha_0 (T - T_0) \right] \quad (3.2)$$

Kako bi ocijenili odnos gustoće i volumena fluida razmotriti će se fluid elementarne mase M . Ta masa se može opisati kao:

$$M = \rho V \quad (3.3)$$

Budući da se masa ne može sama po sebi smanjiti ni povećati dobiva se odnos između gustoće fluida i volumena:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (3.4)$$

Iz ove se jednadžbe vidi da je masa jednaka u stanju 1 i u stanju 2.

Tablica 3.1: Gustoće fluida korištenih u hidrauličkim sustavima kod 20°C

fluid	gustoća [kg/m ³]
voda	998
mineralno ulje	830 - 910

3.2. MODUL ELASTIČNOSTI

Modul elastičnosti izotermne tekućine opisuje elastičnost tekućine pri konstantnoj temperaturi. Ova karakteristika se određuje eksperimentalno. Dobiveni dijagram se naziva modul elastičnosti fluida.

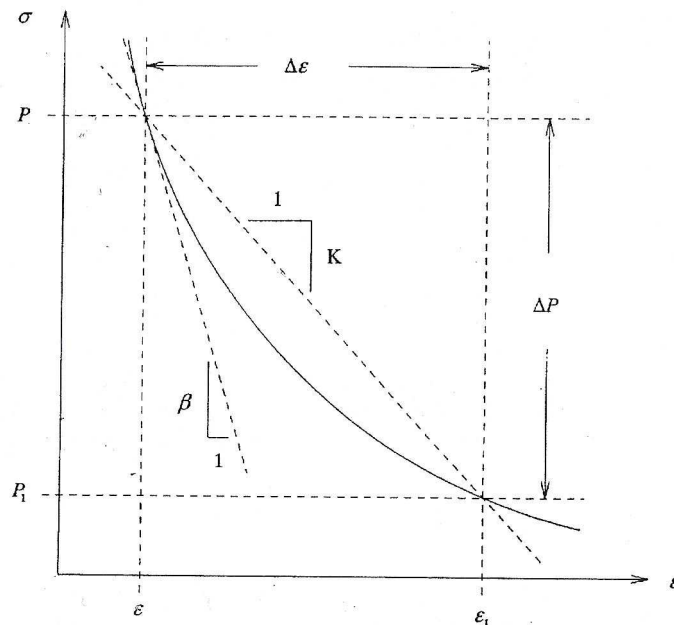
Kao što je prikazano na slici 3.1, krivulja deformacija-naprezanje nije linearna jer se pokazalo da nagib ovisi o tlaku. Na slici je prikazana sekanta modula elastičnosti K i tangenta modula elastičnosti β .

Sekanta modula elastičnosti je definirana kao

$$K = \frac{V_0 P}{V_0 - V} = \frac{\rho P}{\rho - \rho_0} \quad (3.5)$$

Tangenta modula elastičnosti se izražava kao

$$\beta = -V \frac{dP}{dV} = \rho \frac{dP}{d\rho} \quad (3.6)$$



Slika 3.1: Krivulja naprezanje-deformacija; prikazana je sekanta modula elastičnosti K i tangenta modula elastičnosti β

Modul elastičnosti tekućine

Iz eksperimenta je utvrđeno da se sekanta modula elastičnosti svih tekućina povećava linearno porastom tlaka.

$$K = K_0 + mP \quad (3.7)$$

gdje je K_0 sekanta modula elastičnosti tekućine kada je tlak jednak nuli.

Tablica 3.2: Modul elastičnosti fluida K_0 i m (vrijednosti za K_0 su u kbar)

Temperatur a, °C	Mineralna ulja	Voda	Voda-alkohol	Emulzija vode i ulja
0	20,7	19,7	32,0	20,8
10	19,8	20,9	31,8	20,2
20	19,0	21,8	31,5	19,6
30	18,1	22,4	31,1	19,0
40	17,3	22,6	30,5	18,4
50	16,4	22,7	29,9	17,8
60	15,6	22,5	29,1	17,2
70	14,7	22,2	28,2	16,6
80	13,9	21,6	27,2	16,0
90	13,0	21,1	26,0	15,4
100	12,2	20,4	24,8	14,8
m (za sve temp.)	5,6	3,4	4,5	5,0

Za gotovo sve tekućine, vrijednost m je gotovo ista na svim temperaturama, međutim, vrijednost K_o ovisi o temperaturi. Jednadžba vrijedi za mineralna ulja i većinu ostalih hidrauličkih tekućina do tlaka od 800 bar. Ta ista jednadžba vrijedi za vodu do tlaka od 3000 bar. Dakle, ako su odgovarajuće vrijednosti za K_o i m poznate, sekanta modula elastičnosti može se izračunati pomoću jednadžbe 3.7.

Izraz koji se može koristiti za određivanje tangente modula elastičnosti za većinu tekućina

$$\beta_l = K_o \left(1 + (m-1) \frac{P}{K_o} \right) \left(1 + \frac{mP}{K_o} \right) \quad (3.8)$$

Tablica 3.2 prikazuje tipična svojstva fluida koji se najčešće koriste u hidrauličkim sustavima.

Primjer

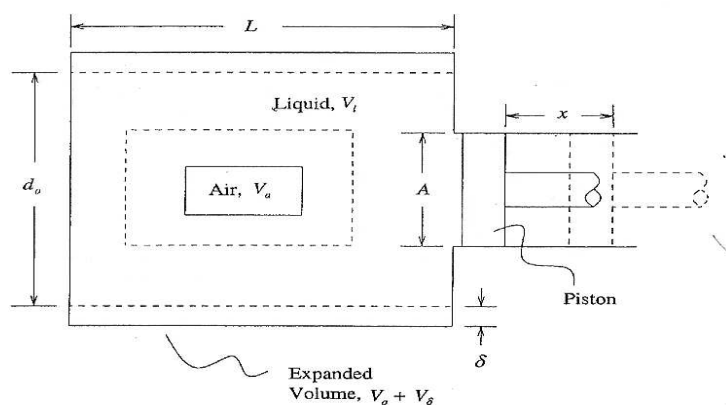
Izračunati će se moduli elastičnosti za tipični sustav korišten u hidrauličkim sustavima.

Usporediti će se mineralno ulje i voda pod tlakom od 20 MPa (0,20 kbar) i temperature 70 °C. Tekućina se nalazi unutar cilindričnog spremnika izrađenog od čelika s vanjskim promjerom 6 puta većim od debljine stijenke ($D_o/t=6$). Razmotriti ćemo dva slučaja tekućine:

1. Kada u tekućini nema zraka
2. Kada je tekućina pomiješana s 1% zraka ($V_a/V_c=0,01$)

Tablica 3.3: Mehanička svojstva materijala spremnika (modul elastičnosti E je u kbar)

Svojstvo	Čelik	Nodularno lijevano željezo	Bakar	Bronca	Aluminij	Visoko tlačne cijevi	TPE
E	2069	1665	1103	1034	724	59	0,0393
ν	0,30	0,28	0,30	0,34	0,33	0,47	0,47



Slika 3.2: Fleksibilni spremnik pod tlakom ispunjen tekućinom i zrakom

Koristeći jednadžbu 3.8 i tablicu 3.2 dobiva se modul elastičnosti mineralnog ulja $\beta_l = 16,81 \text{ kbar}$, a za vodu je $\beta_l = 23,37 \text{ kbar}$.

Za slučaj kada je $D_o/t \gg 1$ modul elastičnosti spremnika izračunavamo prema

$$\frac{1}{\beta_c} = \frac{D_o/t}{E} \rightarrow \beta_c = 344,82 \text{ kbar}$$

Modul elastičnosti zraka se izračunava pomoću $\frac{1}{\beta_a} = \frac{1}{P \gamma}$

gdje je $\gamma = 1,4$ za zrak, te slijedi da je $\beta_a = 0,28 \text{ kbar}$.

Sada kada imamo sve parametre može se izračunati ukupni modul elastičnosti sustava najprije za točku 1.

mineralno ulje

$$\beta_e = \left(\frac{1}{\beta_l} + \frac{V_a}{V_e} \frac{1}{\beta_a} + \frac{1}{\beta_c} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{16,81} + 0 \cdot \frac{1}{0,28} + \frac{1}{344,82} \right)^{-1} = 16,03 \text{ kbar}$$

voda

$$\beta_e = \left(\frac{1}{\beta_l} + \frac{V_a}{V_e} \frac{1}{\beta_a} + \frac{1}{\beta_c} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{23,37} + 0 \cdot \frac{1}{0,28} + \frac{1}{344,82} \right)^{-1} = 21,89 \text{ kbar}$$

Isto izračunato za točku 2.

mineralno ulje

$$\beta_e = \left(\frac{1}{\beta_l} + \frac{V_a}{V_e} \frac{1}{\beta_a} + \frac{1}{\beta_c} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{16,81} + 0,01 \cdot \frac{1}{0,28} + \frac{1}{344,82} \right)^{-1} = 10,19 \text{ kbar}$$

voda

$$\beta_e = \left(\frac{1}{\beta_l} + \frac{V_a}{V_e} \frac{1}{\beta_a} + \frac{1}{\beta_c} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{23,37} + 0,01 \cdot \frac{1}{0,28} + \frac{1}{344,82} \right)^{-1} = 12,28 \text{ kbar}$$

Primjećuje se da sustavi s vodom kao fluidom imaju nešto viši modul elastičnosti od sustava u kojima se koristi mineralno ulje. Iz toga se zaključuje da su sustavi s vodom krući. Samim time upravljanje je preciznije, a odzivi sustava su brži.

3.3. TOPLINSKA SVOJSTVA FLUIDA

3.3.1. KOEFICIJENT TOPLINSKE EKSPANZIJE

Koeficijent izobarne toplinske ekspanzije za hidrauličke tekućine za prijenos energije je predstavljen jednadžbom

$$\alpha \equiv \frac{-1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (3.9)$$

gdje je T temperatura tekućine. Koeficijent toplinskog rastezanja se povećava ili smanjuje u ovisnosti o temperaturi tekućine. Budući da se fluid sastoji od tekućine i zraka, a spremnik je također izložen ekspanziji razmatra se učinak toplinske ekspanzije na cijeli sustav.

Učinak koeficijenta toplinske ekspanzije

Korištenjem koeficijenata toplinske ekspanzije za tekućinu i zrak:

$$\alpha_l = \frac{1}{V_l} \frac{dV_l}{dT} \quad \text{i} \quad \alpha_a = \frac{1}{V_a} \frac{dV_a}{dT} \quad (3.10)$$

i koeficijent toplinske ekspanzije za spremnik

$$\alpha_c = \frac{1}{V_e} \frac{dV_\delta}{dT} \quad (3.11)$$

dobiva se

$$\alpha_e = \left(1 + \frac{V_\delta}{V_e} \right) \alpha_l + \left(1 - \frac{\alpha_l}{\alpha_a} \right) \frac{V_a}{V_e} \alpha_a - \alpha_c \quad (3.12)$$

Uvrštavanjem $V_e \gg V_\delta$ može se jednadžba 3.12 aproksimirati kao

$$\alpha_e = \alpha_l + \left(1 - \frac{\alpha_l}{\alpha_a}\right) \frac{V_a}{V_e} \alpha_a - \alpha_c \quad (3.13)$$

Tablica 3.4 prikazuje djelomični popis podataka dostupnih za procjenu koeficijenta toplinske ekspanzije mineralnih ulja i vode.

Tablica 3.4: Volumenski koeficijent toplinske ekspanzije tekućina koje se koriste unutar hidrauličkih sustava [$10^{-4}/(^{\circ}\text{C}$ ili K)]

	Temperatura, $^{\circ}\text{C}$						
	0	20	40	60	80	100	120
Mineralno ulje	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Voda	-0,68	1,73	3,60	5,04	6,24	7,28	8,40

Izobarni koeficijent toplinske ekspanzije zraka može se odrediti pomoću jednadžbe idealnog plina koja glasi:

$$\rho T = \frac{P}{R} = \text{const.} \quad (3.14)$$

Pojednostavljenjem dobivamo sljedeći oblik za koeficijent toplinske ekspanzije zraka

$$\alpha_a = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{T} \quad (3.15)$$

Volumenski koeficijenti toplinske ekspanzije za tipične hidrauličke rezervoare dani su u tablici 3.5.

Tablica 3.5: Volumenski koeficijent toplinske ekspanzije materijala koji se obično koriste za hidrauličkih sustava

	Čelik	Nodularni željezni lijev	Bakar	Bronca	Aluminij	Visoko tlačne cijevi	TPE
$10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ ili K	22,0	26,4	34,0	38,0	48,0	447	460
$10^{-6} / ^{\circ}\text{F}$ ili $^{\circ}\text{R}$	12,2	14,7	18,8	21,2	26,6	248	256

Primjer

Razmotriti će se koeficijent toplinskog širenja na primjeru fluida na bazi nafte (mineralno ulje) i vode, koji su zagrijani na temperaturu od 60°C i nalaze se unutar valjkaste posude. Iz tablice 3.4 mogu se izvaditi koeficijenti toplinske ekspanzije ovih tekućina i iznose $\alpha_l = 7 \times 10^{-4} / ^{\circ}\text{C}$ za ulje i $\alpha_l = 5,04 \times 10^{-4} / ^{\circ}\text{C}$ za vodu. Koeficijent toplinske ekspanzije za zrak dobiva se koristeći

$$\alpha_a = \frac{1}{(T_c + 273,15)^{\circ}\text{C ili K}} \rightarrow \alpha_a = 3 \times 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}$$

Potrebno je izračunati koeficijent toplinske ekspanzije fluida za sljedeće slučajeve:

1. Kada je spremnik izrađen od čelika a u tekućini nema zraka
2. Kada je spremnik izrađen od čelika a tekućina je pomiješana s 1% zraka ($V_a/V_e = 0,01$)

Koeficijent toplinske ekspanzije čeličnog spremnika može se odrediti pomoću tablice 3.5. Iz tablice je izvađeno $\alpha_c = 22 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$. Koristeći ovaj podatak dobiva se koeficijent toplinske ekspanzije za prvi slučaj kada je fluid mineralno ulje

$$\alpha_e = \alpha_l - \alpha_c = \frac{7 \times 10^{-4}}{^{\circ}\text{C}} - \frac{22 \times 10^{-6}}{^{\circ}\text{C}} = \frac{6,78 \times 10^{-4}}{^{\circ}\text{C}}$$

i za vodu

$$\alpha_e = \alpha_l - \alpha_c = \frac{5,04 \times 10^{-4}}{^{\circ}\text{C}} - \frac{22 \times 10^{-6}}{^{\circ}\text{C}} = \frac{4,82 \times 10^{-4}}{^{\circ}\text{C}}$$

Slično tome, za drugi slučaj, koeficijent toplinske ekspanzije za mineralno ulje pomiješano s zrakom ispada

$$\alpha_e = \alpha_l + \left(1 - \frac{\alpha_l}{\alpha_a}\right) \frac{V_a}{V_e} \alpha_a - \alpha_c = \frac{7 \times 10^{-4}}{^{\circ}\text{C}} + \left(1 - \frac{7 \times 10^{-4}}{3 \times 10^{-3}}\right) 0,01 \frac{3 \times 10^{-4}}{^{\circ}\text{C}} - \frac{22 \times 10^{-6}}{^{\circ}\text{C}} = \frac{6,80 \times 10^{-4}}{^{\circ}\text{C}}$$

a za vodu

$$\alpha_e = \alpha_l + \left(1 - \frac{\alpha_l}{\alpha_a}\right) \frac{V_a}{V_e} \alpha_a - \alpha_c = \frac{5,04 \times 10^{-4}}{^{\circ}\text{C}} + \left(1 - \frac{5,04 \times 10^{-4}}{3 \times 10^{-3}}\right) 0,01 \frac{3 \times 10^{-4}}{^{\circ}\text{C}} - \frac{22 \times 10^{-6}}{^{\circ}\text{C}} = \frac{4,84 \times 10^{-4}}{^{\circ}\text{C}}$$

Zaključak je da voda ima manji koeficijent toplinskog širenja od ulja. Dok ulje ima konstantan koeficijent širenja, vodi se on povećava porastom temperature i tek na 100°C dostiže ulje. Rezultat toga je da sustavi imaju manje oscilacije volumena tekućine s porastom temperature.

3.3.2. TOPLINSKA VODLJIVOST

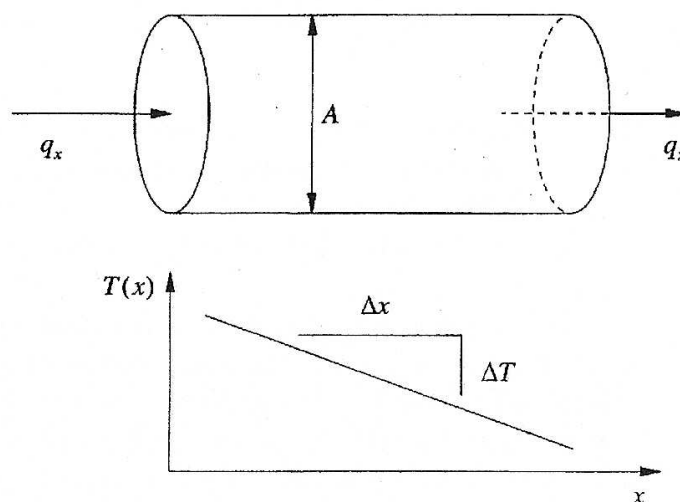
Stopa po kojoj se toplina prenosi kroz materijal definirana je Fourier-ovim zakonom. Ovaj se zakon temelji na uočenim pojavama i pokazuju kako je toplinski tok proporcionalan gradijentu topline u smjeru normale na površinu. Po definiciji, toplinska vodljivost materijala je

$$k = \frac{-q_x}{A} \frac{1}{(\partial T / \partial x)} \approx \frac{q_x}{A} \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (3.16)$$

gdje je q_x toplina koja se prenosi kroz materijal. Tablica 3.6 daje vrijednosti toplinske vodljivosti za mineralna ulja i vodu koja varira s temperaturom.

Tablica 3.6: Vrijednosti toplinske vodljivosti k [$10^{-3} \text{ W/(m } ^{\circ}\text{C)}$]

	Temperatura, °C						
	0	20	40	60	80	100	120
Mineralno ulje	147	145	145	141	138	137	135
Voda	569	598	628	650	668	679	686



Slika 3.3: Odnos između koordinatnog sustava, smjera toplinskog toka, gradijenta temperature u jednoj dimenziji

3.3.3. SPECIFIČNI TOPLINSKI KAPACITET

Specifični toplinski kapacitet je termodinamička je veličina koja se koristi za određivanje promjene unutarnje energije uslijed promjene temperature. Specifični toplinski kapacitet za tvari koje imaju konstantan volumen dan je izrazom

$$c_v \equiv \frac{\partial u}{\partial T} \quad (3.17)$$

gdje je u specifična unutarnja energija tvari. Ako se unutarnju energiju smatra kao mjeru dovodenja topline tvari, možemo vidjeti da je specifični toplinski kapacitet c_v iznos potrebne topline za podizanje temperature tvari po jedinici temperature. Termodinamička svojstva entalpije dana su izrazom

$$h \equiv u + Pv \quad (3.18)$$

gdje je u specifična unutarnja energija, P je tlak a v je specifični volumen. Po definiciji, specifična toplina kod izobarnih procesa je dana izrazom

$$c_p \equiv \frac{\partial h}{\partial T} \quad (3.19)$$

Prema jednadžbi (1.96) s obzirom na temperaturu, može se napisati

$$c_p = \frac{\partial h}{\partial T} = \frac{\partial u}{\partial T} + P \frac{\partial v}{\partial T} = \frac{\partial u}{\partial T} + P v \alpha \quad (3.20)$$

gdje je α izobarni koeficijent toplinskog rastezanja. Budući da je α vrlo mali za tekućine (Tablica 3.4), može se pokazati da je promjena unutarnje energije približno jednaka promjeni entalpije, i stoga slijedi

$$c_v = c_p \quad (3.21)$$

za tekućine koje se najčešće koriste u hidrauličkim sustavima.

Tablica 3.7: Specifični toplinski kapacitet c_p [kJ/(kg °C)]

	Temperatura, °C						
	0	20	40	60	80	100	120
Mineralno ulje	1,796	1,868	1,951	2,035	2,118	2,206	2,294
Voda	4,217	4,184	4,178	4,184	4,195	4,214	4,239

Voda ima znatno viši specifični toplinski kapacitet i toplinsku vodljivost, tako da je potreban manji koeficijent hlađenja za sustave u kojima se koristi..

3.4. VISKOZNOST FLUIDA

Viskoznost je veoma važna karakteristika hidrauličkih tekućina i predstavlja veličinu unutrašnjeg trenja, koje djeluje kao otpor kretanju čestica tekućine kada su one izložene smičnom naprezanju. Viskoznost se prema Newtonovom zakonu može izraziti prema:

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (3.22)$$

gdje je F sila koja dovodi do kretanja, A je veličina kontaktne površine, η je dinamička viskoznost a dv/dx je gradijent brzine.

Ako se odnos F/A označi sa τ što označava napon smicanja, a dv/dx s D što je brzina smicanja, dobije se poznata jednadžba:

$$\eta = \frac{\tau}{D} \quad (3.23)$$

Kod Newtonovih fluida viskoznost za razne vrijednosti brzine ili sile smicanja je konstantna veličina, a kod nenewtonovih fluida je promjenjiva veličina. Hidraulička ulja ulaze u grupu Newtonovskih fluida, ali kod niskih temperatura, kada vrijednost viskoznosti poraste, ponašaju se kao nenewtonovi sustavi. Kod Newtonovskih tekućina viskoznost je ovisna jedino o temperaturi i tlaku.

Dinamička viskoznost (η) se izražava za Newtonovske tekućine u Pa s:

$$1 \text{ Pa s} = 1 \text{ N s/m}^2 = 1 \text{ kg/(m s)}$$

Kinematička viskoznost (ν) se definira kao odnos dinamičke viskoznosti i gustoće tekućine:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.24)$$

čemu odgovara dimenzija

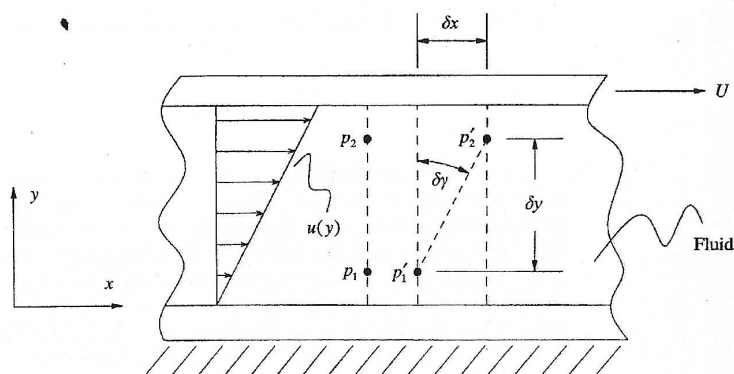
$$1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 1 \text{ Pa s} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Prema međunarodnom sistemu mjernih jedinica nije definirano, ali je dozvoljeno, da se kinematička viskoznost označava u stoksima:

$$1 \text{ St} = 10^2 \text{ cSt} = 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$$

Tablica 3.8: Vrijednosti koeficijenta dinamičkog viskoziteta

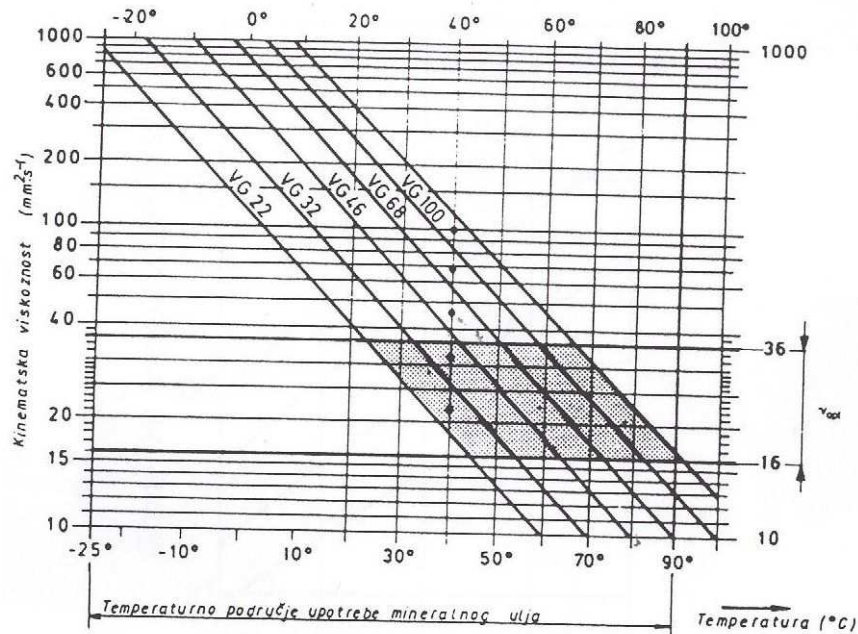
	voda (20 °C)	voda (100 °C)	etanol (20 °C)	motorno ulje SAE 30 (20 °C)	hidrauličko ulje ISO VG 46 (40°C)
$\eta(\text{Pa s})$	0,0010087	0,00028	0,00011	0,03	0,04177



Slika 3.4: Shematski prikaz posmične deformacije unutar fluida

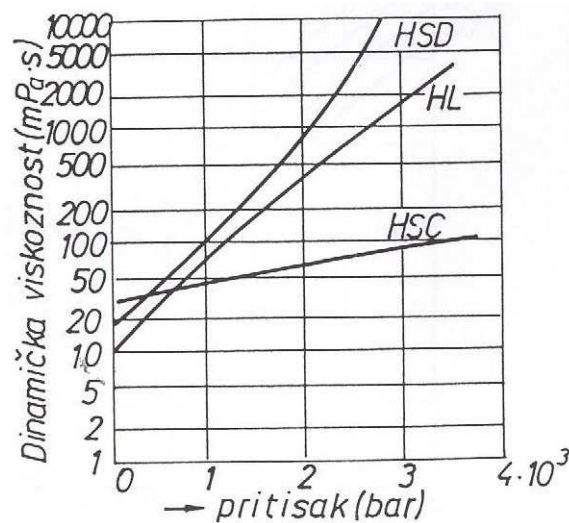
Utjecaj temperature na promjenu viskoznosti

Viskoznost fluida se mijenja porastom temperature prema određenoj zakonitosti. Brzina promjene viskoznosti je veoma važna karakteristika hidrauličkih fluida. Karakteristika koja govori o tome kojom se brzinom mijenja viskoznost s promjenom temperature naziva se indeks viskoznosti. Brzina promjene viskoznosti je svojstvo koje zavisi o molekularnoj strukturi ulja, ali se može bitno poboljšati dodavanjem aditiva.



Slika 3.5: Promjena viskoznosti mineralnih ulja u odnosu na promjenu temperature

Kod rada sa uljima niske viskoznosti nema dobrog podmazivanja komponenti hidrauličnog sistema, a i velika su protjecanja kroz zračnosti, što utječe na porast temperature i volumenske gubitke. Kod rada s uljima visoke viskoznosti mogu nastati teškoće u radu pumpe zbog smanjenja volumena punjenja, a može se pojaviti i kavitacija. Hidraulički sistem je "trom", a gubici su veliki.



Slika 3.6: Promjena dinamičke viskoznosti s promjenom temperature

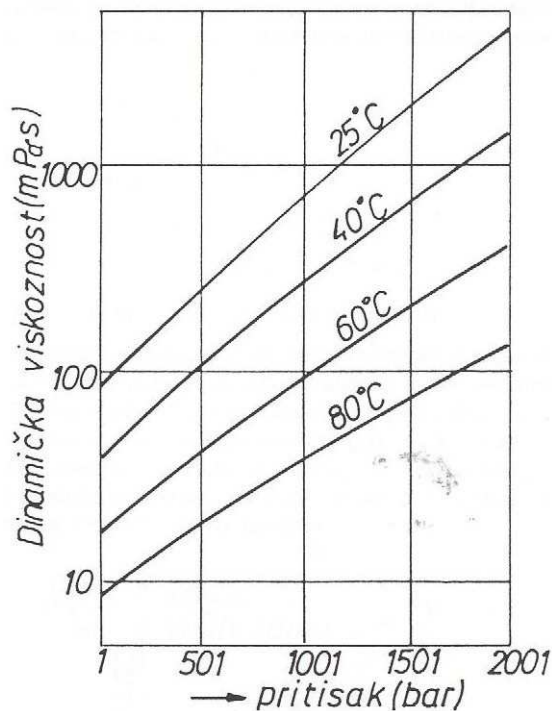
HL - mineralno ulje

HSD - sintetska tekućina na bazi fosfatestera

HSC - emulzija sa najmanje 35% vode

U hidrauličnim sustavima se osim temperature najčešće mijenja tlak, pa se ovisno o njima mijenja i viskoznost.

Voda ima puno manju viskoznost od konvencionalnih tekućina koje se koriste u hidrauličnim sustavima. To omogućuje lakši protok tekućine kroz ventile, ali i veće gubitke kroz brtve.



Slika 3.7: Promjena dinamičke viskoznosti u odnosu na promjenu temperature i tlaka - vrsta ulja: HL - VG 32

3.5. TLAK PARA

Ovisi o kombinaciji tlaka i temperature na kojoj sve tekućine teže da ispare. Tlak na kojem se to dešava, zove se tlak para tekućine i mora biti naveden za danu temperaturu. Npr. voda ima tendenciju da ispari na atmosferskom tlaku, kada temperatura dosegne 100 °C. To jest, apsolutni tlak para vode kod 100 °C je 101 kPa. Ako tlak padne ispod 1 atm (101 kPa), voda će ispariti na nižoj temperaturi. Slično tome, ako se tlak poveća iznad 1 atm, voda će ispariti na temperaturama većim od 100 °C. Tlak para je veoma važan, jer mjehurići pare nemaju tendenciju da se otope u tekućini kao mjehurići zraka, nego putuju s tekućinom. Kada se mjehurić pare uruši blizu površine uzrokuje eroziju stjenke i može ozbiljno oštetiti mehaničke dijelove sustava. Ovaj fenomen se naziva kavitacija, a termin je definirao R.E. Froude (1810. - 1879.). Zbog lokalnih smanjenja tlaka koji se javljaju kod velikih brzina protoka, mjehurići pare se formiraju na umjerenim temperaturama hidrauličkih sustava. Nakon što se ovi mjehurići izlože većem tlaku, recimo, kada se brzina tekućine smanji, mjehurići se urušavaju s udarnim pokretima koji stvaraju velike tlakove. Ako se urušavanje desi blizu površine, tlakovi mogu biti dovoljno veliki da na površini izazovu velika naprezanja. Kao rezultat učestalim izlaganjima kavitaciji, površina će se na kraju oštetiti i strukturni dio se može uništiti u potpunosti.

Tlak para za tekućine na bazi nafte kod operativne temperature 65 °C je izuzetno nizak, odnosno oko 350 Pa. Tekućine na bazi vode, kao što su mješavine voda-alkohol i voda-ulje, zbog visokog sadržaja vode imaju mnogo veći tlak pare nego tekućine na bazi nafte. Tlak para za vodu na 60°C je 20 kPa.. Zbog toga je rizik od pojave kavitacije veći pa treba dobro projektirati sustav.

3.6. KEMIJSKA SVOJSTVA

Ova svojstva nemaju toliku ulogu kao što su ona koja su ranije opisana ali su isto važna.

Emulzivnost

Opisuje svojstvo tekućine da se nalazi u obliku emulzije. Emulzija je tekućina koja se dobiva dodavanjem masnih tekućina u druge tekućine, često pomoću ljepljivih supstancija.

Mazivost

Opisuje "masnoću" tekućine i odnosi se na njezine sposobnosti kada se koristi kao mazivo. Mnoga ulja sadrže molekularne spojeve koji podižu sposobnost mazivosti. Neka biljna ulja, kao što su ricinusovo i repičino ulje, sadrže više prirodnih maziva od mineralnih ulja. Zbog toga se mineralnim uljima dodaju aditivi koji poboljšavaju maziva svojstva. Izostanak adekvatnog podmazivanja dovodi do pojačanoga trošenja hidrauličkih komponenti, što skraćuje životni vijek.

Toplinska stabilnost

Opisuje sposobnost tekućine da se odupre kemijskim reakcijama i razgradnji pri povišenim temperaturama. Tekućine reagiraju burno kod viših temperatura i reakcije mogu formirati čvrste proizvode.

Oksidacijska stabilnost

Opisuje sposobnost tekućine da se odupre reakciji s materijalima koji sadrže kisik. Ove reakcije također mogu formirati čvrste proizvode unutar tekućine.

Hidroskopska stabilnost

Opisuje sposobnost tekućine da se odupre reakciji s vodom. Može dovesti do formiranja neželjenih tijela ili stabilna emulzija vode u ulju može dovesti do smanjenja sposobnosti podmazivanja i poticati koroziju. Deemulzijski aditivi se često koriste kao inhibitori vode u ulju.

Kompatibilnost

Opisuje sposobnost fluida da se odupre kemijskim reakcijama s bilo kojim materijalom u sustavu. Na primjer, neke tekućine imaju tendenciju da omekšaju brtve. Voda je nespojiva s čelikom jer uzrokuje koroziju.

Pjenjenje

Taj se pojam koristi za opisivanje sposobnosti tekućine da formira emulzije s plinovima, uglavnom zrakom. Pomiješani zrak smanjuje sposobnost podmazivanja i modul elastičnosti tekućina. Smanjenje mase može ograničiti dinamičke performanse, i zbog tog razloga, tekućina mora imati sposobnost otpuštanja zraka, bez formiranja emulzije.

Plamište

Plamište ili točka zapaljivosti neke tekućine je najniža temperatura pri kojoj se iz tekućine razvijaju pare u tolikoj količini da se pomiješane s zrakom mogu zapaliti kada se površini tekućine prinese otvoreni plamen. Na osnovi podatka o temperaturi plamišta može se procijeniti opasnost od požara. Što je plamište niže opasnost je veća.

Stinište

Ili temperatura stinjavanja je temperatura pri kojoj tekućina gubi sposobnost tečenja. Ovo svojstvo je važno zbog podmazivanja u hidrauličkim sustavima.

3.7. STRUJANJE FLUIDA

3.7.1. REYNOLDSOV BROJ

Reynoldsov broj se koristi za karakterizaciju vrste strujanja fluida i za utvrđivanje odgovarajuće jednačbe za analizu. Reynoldsov broj općenito je predstavljen u jednačbi

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (3.25)$$

gdje je ρ gustoća tekućine, U je brzina tekućine u polju toka, L je duljina unutar polja toka i μ je apsolutna viskoznost tekućine. Da bismo mogli izračunati Reynoldsov broj za protok unutar hidrauličnog sustava, tok strujanja mora biti zatvoren unutar cjevovoda. Veličina i geometrija prolaza mogu se koristiti za karakterizaciju dimenzije duljine unutar polja strujanja.

Uvrštavanjem brzine strujanja i duljine cjevovoda dobivamo sljedeći izraz za Reynoldsov broj koji se koristi za karakterizaciju protoka unutar hidrauličnog sustava

$$Re = \frac{\rho Q D_h}{\mu A} \quad (3.26)$$

Karakteristike Reynoldsovog broja su sljedeće

$Re \gg 1$ visoki Reynoldsov brojevi protoka

$Re \ll 1$ niski Reynoldsovi brojevi protoka

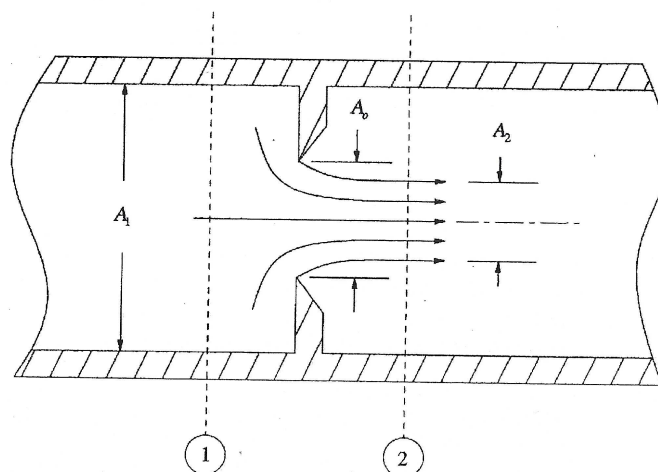
3.7.2. BERNOULLIJEVA JEDNADŽBA PROTOKA I JEDNADŽBA OTVORA

Jedna od najvažnijih praktičnih jednačbi za modeliranje hidrauličkih sustava je klasična jednačba otvora. Jednačba se temelji na Bernoullijevoj jednačbi i zbog toga se koristi za mjereni estlačiv tok, visokog Reynoldsovog broja. Slika 3.8 prikazuje protok kroz otvor s oštrim rubovima.

Pošto fluid ne može skrenuti pod velikim kutom javlja se suženje mlaza. Omjer mlaza i površine otvora naziva se koeficijent kontrakcije i glasi:

$$C_c = \frac{A_2}{A_0} \quad (3.27)$$

Koeficijent kontrakcije određuje se eksperimentalno za različite geometrije prolaza. Neki od tih eksperimentalnih rezultata prikazani su na slici 3.9.



Slika 3.8: Strujanje visokim Reynoldsovim brojem kroz otvor A_2

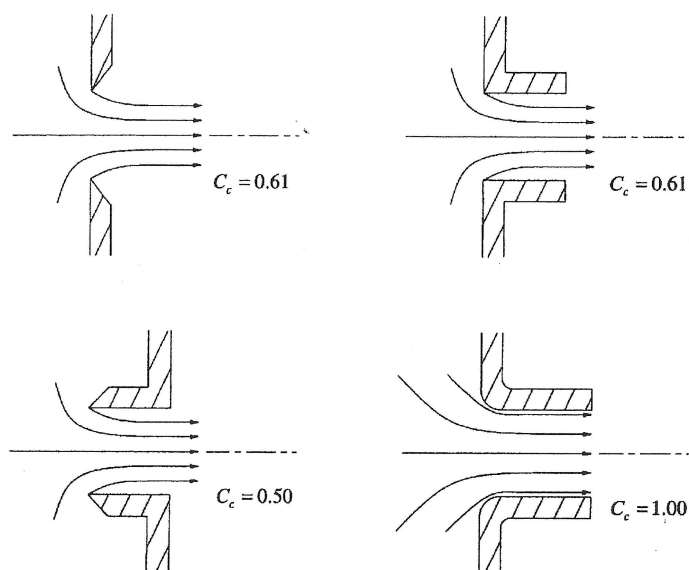
Klasična jednačba otvora glasi:

$$Q = A_o C_d = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (3.28)$$

gdje je C_d naziv za koeficijent pražnjenja i definiran je kao

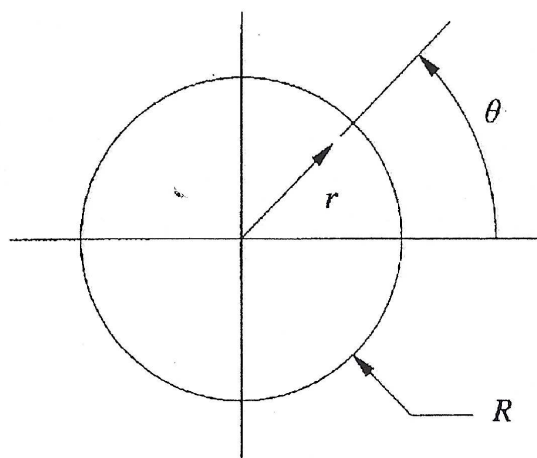
$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 - C_c^2 \left(\frac{A_o}{A_1} \right)^2}} \quad (3.29)$$

Budući da je A_o obično mnogo manji nego A_1 , koeficijent pražnjenja je obično vrlo sličan koeficijentu kontrakcije. Međutim, koeficijent pražnjenja mora biti određen eksperimentalno za različite slučajeve geometrije. Kad geometrija nije točno poznata, ili kada eksperimenti nisu dostupni, za oštre rubove otvora obično se koristi koeficijent od 0,62.



Slika 3.9: Koeficijenti kontrakcije određeni eksperimentalno za različite geometrije prolaza

3.7.3. POISEUILLOV ZAKON



Slika 3.10: Protok kroz kružni presjek niskim Reynoldsovim brojem

Slika 3.10 predstavlja cijev kružnog poprečnog presjeka kroz koju struju protok niskog Reynoldsovog broja. Protok fluida kroz cilindrični prolaz računa se prema izrazu

$$Q = \frac{\Pi R^4 \Delta p}{8 \mu l} \quad (3.30)$$

koji je poznat kao Poiseuilleov zakon.

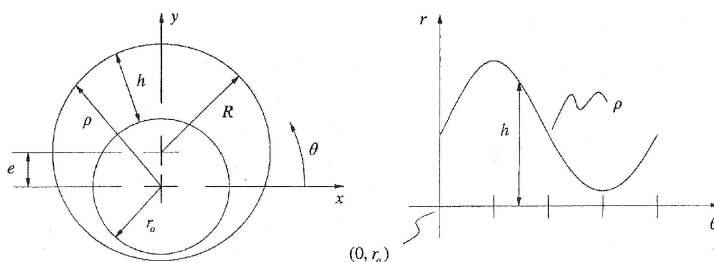
3.7.4. JEDNADŽBA PRSTENASTOG PROPUŠTANJA

Kako se ispostavlja, jedan od najkorisnijih primjena korištenja jednadžbe protoka za niske Reynoldsove brojeve je jednadžba prstenastog propuštanja. Na slici 3.11, Poiseuilleov protok se zbiva između kružne cijevi i okrugli metak u smjeru normale. Umetak se nalazi izvan središta cijevi za veličinu e . Volumenski protok kroz prstenasti prolaz izračunava se izrazom

$$Q = \frac{\Pi R (R - r_o)^3 \Delta p}{6 \mu l} \left(1 + \frac{3}{2} \epsilon^2 \right) \quad (3.31)$$

gdje je Δp pad tlaka u smjeru z , a l je dužina toka u smjeru z .

Ovo je klasična jednadžba prstenastog propuštanja koja nalazi primjenu u modeliranju istjecanja protoka u hidrauličkim sustavima. Razlog tome je što je okrugla geometrija najjednostavnija prilikom izgradnje hidrauličke opreme.



Slika 3.11: Shematski put prstenastog curenja

3.8. GUBICI TEKUĆINE

Veliki gubici

Pad tlaka u cjevovodima svrstavamo u skupinu velikih gubitaka, a iskazuje se prema jednadžbi

$$\Delta p = \frac{8 \mu Q l}{\Pi R^4} = \frac{32 \mu V l}{D^2} \quad (3.32)$$

Iako se većina hidrauličkih sustava sastoji od više ravnih cijevi, oni su također sastavljeni i od nekoliko kraćih i krivudavih dijelova kroz koje teče fluid.

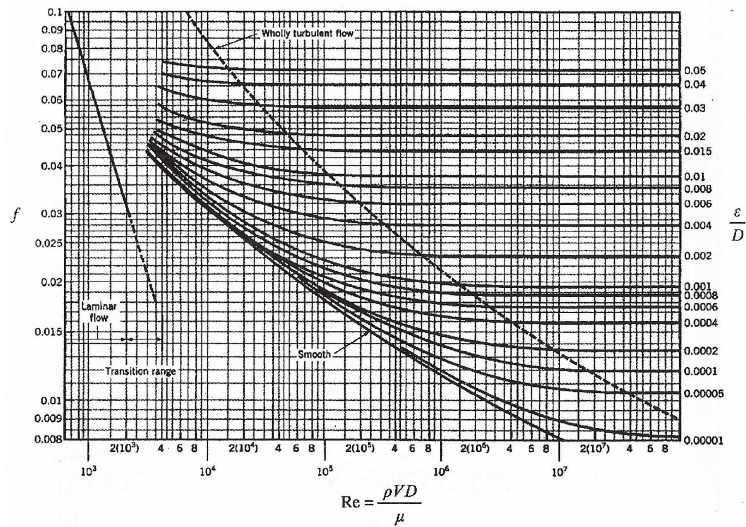
Mali gubici

Ti gubici proizlaze iz oštih geometrijskih promjena u sustavu i obično su stvoreni dodavanjem ventila i oštih zavoja u toku. Klasifikacija tih gubitaka kao mali je često pogrešna, jer su ti gubici često veći od velikih gubitaka i obično se moraju uzeti u obzir pri analizi gubitaka snage i toplinske energije iz hidrauličkih sustava.

Manji gubici tlaka dani su jednadžbom

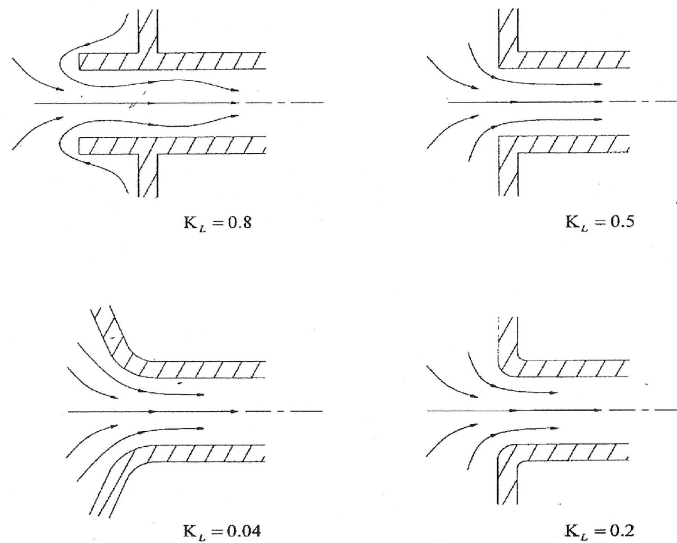
$$\Delta p = K_L \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3.33)$$

Iz Moodyevog dijagrama prikazanog na slici 3.12 može se izvući zaključak da koeficijent gubitaka više ovisi o geometriji cjevovoda nego o Reynoldsovom broju. To je prikazano s relativno ravnim linijama za faktor trenja u režimu visokih Reynoldsovih brojeva.



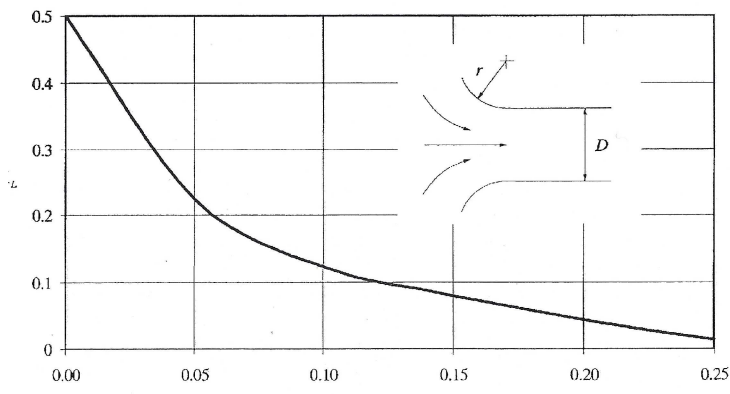
Slika 3.12: Moodyev dijagram

Slika 3.13 prikazuje četiri geometrijska uvjeta, te njihove koeficijente gubitaka za tekućine koje ulaze u cijev iz velikog spremnika. Kod naglih skokova geometrije, koeficijent gubitaka je veći nego kad se geometrija postepeno mijenja. Ovaj učinak je detaljnije prikazan na slici 3.14, gdje se eksperimentalni rezultati koeficijenta gubitaka iskazuje kao funkcija radijalne geometrije na ulazu u cijev.



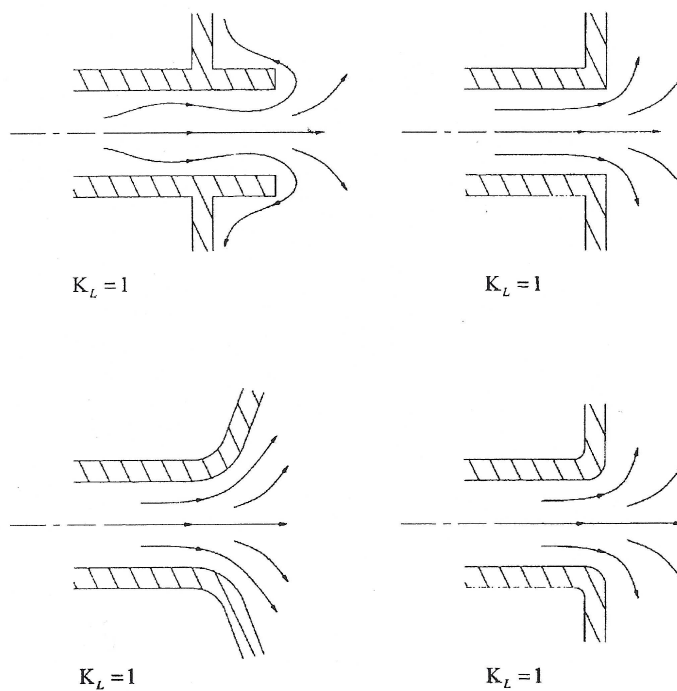
Slika 3.13: Koeficijenti gubitaka za slučaj ulaza u cijev

Slika 3.15 pokazuje četiri geometrijska uvjeta, te njihovu povezanost s koeficijentom gubitaka za tekućinu koja izlazi iz cijevi te utječe u veliki spremnik. U tom slučaju strujanja fluida, otpor ne stvaraju toliko posmična naprezanja na površini kod nagle promjene geometrije, koliko ga stvara turbulentno miješanje u spremniku. Ovaj otpor je viskozni tip gubitaka, a sva kinetička energija povezana s medijem se raspršuje u obliku topline.



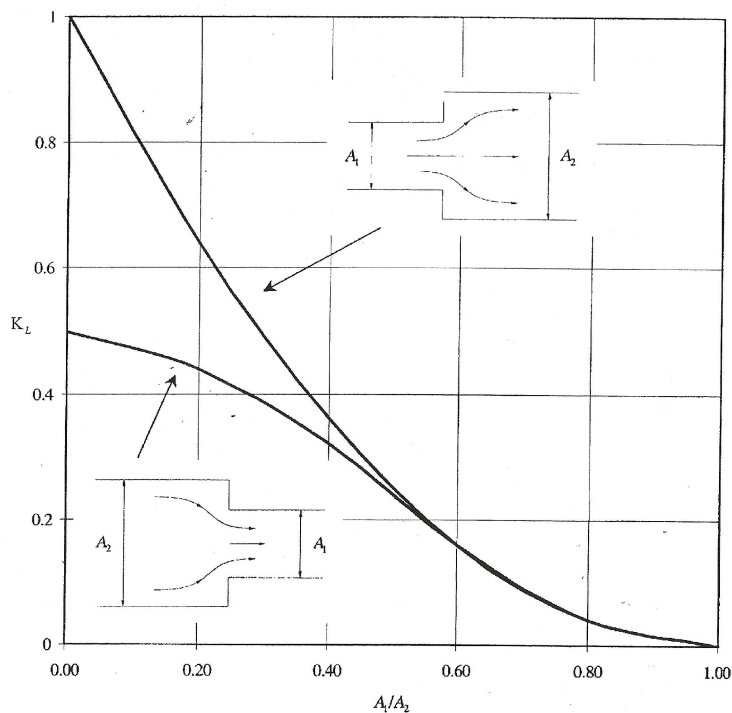
Slika 3.14: Koeficijent gubitaka kod zaobljenih rubova

Manji gubici također su izraženi u cijevi toka gdje se nalaze nagle ekspanzije. Ovi koeficijenti gubitaka prikazani su na slici 3.16 za obje vrste geometrijskih promjena. Geometrija povezana s naglim kontrakcijama zahtijeva eksperimentalno određivanje koeficijenta otpora. Na slici 3.16 može se vidjeti da kad je $A_1 \ll A_2$, slučaj se približava beskonačnom stanju, baš kao što je prikazano na slikama 3.13 i 3.15. Kada je $A_1 = A_2$, nema geometrijske promjene, tako da je koeficijent gubitaka jednak nuli.



Slika 3.15: Koeficijenti gubitaka za slučaj izlaska iz cijevi

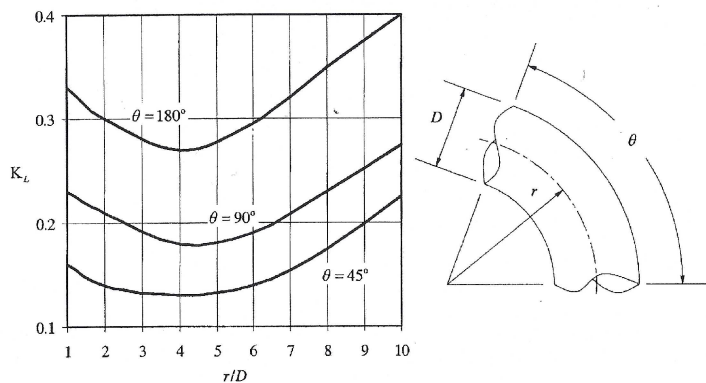
Slika 3.17 pokazuje koeficijent gubitaka kroz savinute cijevi. Iz tih se podataka može vidjeti da se gubitak tlaka povećava kod jače zakrivljenih cijevi, ali i da je minimalni gubitak za određeni zavoj postignut kada je omjer radijusa zavoja / promjera cijevi oko 4,5. Ostali koeficijenti gubitaka koji su obično sadržani u hidrauličkim sustavima prikazani su u tablici 3.9.



Slika 3.16: Koeficijenti gubitaka za slučaj naglog proširenja cijevi

Tablica 3.9: Tipični koeficijenti gubitaka u hidrauličkim sustavima

	K_L	
	tipični ventil	tipični raspon
lijevak	0,9	0,2 – 2,0
difuzor	0,8	0,2 – 1,2
nepovratni ventil	0,8	0,5 – 1,5
zasunski ventil (potpuno otvoren)	0,15	0,1 – 0,3
zasunski ventil (1/4 zatvoren)	0,26	-
zasunski ventil (1/2 zatvoren)	2,1	-
zasunski ventil (3/4 zatvoren)	17,0	-
kuglasti ventil (potpuno otvoren)	0,05	-
kuglasti ventil (1/3 zatvoren)	5,5	-
kuglasti ventil (2/3 zatvoren)	210,0	-
leptir ventil (potpuno otvoren)	0,2	0,2 – 0,6
klipni ventil (potpuno otvoren)	4,0	3,0 – 10,0

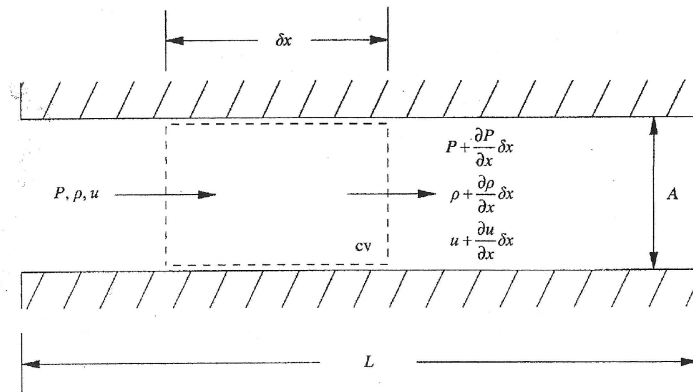


Slika 3.17: Koeficijenti gubitaka kod cijevnog luka

3.9. PRIJELAZNE POJAVE

3.9.1. STRUJANJE KROZ HIDRAULIČKE CIJEVI

Prijelazne pojave u hidrauličkim sustavima su analizirane pomoću nestabilnih momenta i jednačbe za očuvanje mase fluida, koja opisuje kompresibilnost tekućine s obzirom na tlak. Slika 3.18 pokazuje kontrolni volumen unutar hidrauličnog kanala. Ukupna dužina cijevi je definirana veličinom L , a površina presjeka cjevovoda je definirana s A . Diferencijalna duljina cjevovoda je δx .



Slika 3.18: Analiza kontrolnog volumena za hidrauličke cijevi

Kontrolni volumen je fiksiran u prostoru, a hidraulička tekućina prolazi kroz kontrolni volumen u smjeru x . Zbog male dužine kontrolnog volumena, pokazalo se da se tlak, gustoća i brzina tekućine linearno razlikuju po duljini samog kontrolnog volumena. Jednačba za očuvanje mase za hidrauličku cijev glasi

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\delta x} \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) A dx - u \rho A + \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} \delta x \right) \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} \delta x \right) A = 0 \quad (3.34)$$

Očuvanje momenta tekućine za hidraulične cijevi može se izraziti kao

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial(u\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2\rho)}{\partial x} = 0 \quad (3.35)$$

Iz jednačbe stanja za tekućine, mogu se napisati promjene u gustoći i tlaku s obzirom na udaljenost

i vrijeme kao

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial P}{\partial x} \quad \text{i} \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (3.36)$$

gdje je β modul elastičnosti većine tekućina.

3.9.2. NEDIMENZIONALNE JEDNADŽBE

Kako bi se stekao uvid u dominantne fizikalne veličine tlaka unutar hidrauličke cijevi, prikladne su nedimenzionalne jednadžbe koje se dobiju skaliranjem svih fizikalnih veličina unutar sustava.

Ovo skaliranje parametara daje

$$P = \hat{P} P_o \quad u = \hat{u} u_o \quad \rho = \hat{\rho} \rho_o \quad x = \hat{x} L \quad t = \hat{t} \tau \quad (3.37)$$

gdje su parametri bezdimenzionalni, dok su P_o , u_o i ρ_o karakteristike tlaka, brzine i gustoće fluida unutar volumena, L je dužina cijevi prikazana na slici 3.18, a τ je vremenska karakteristika,

Nedimenzionalna jednadžba stanja se može izraziti kao

$$\frac{1}{\hat{\rho}} \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial \hat{x}} = \frac{P_o}{\beta} \frac{\partial \hat{P}}{\partial \hat{x}} \quad \frac{1}{\hat{\rho}} \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial \hat{t}} = \frac{P_o}{\beta} \frac{\partial \hat{P}}{\partial \hat{t}} \quad \text{i} \quad (3.38)$$

Kombiniranjem jednadžbi stanja i mase, može se napisati sljedeći bezdimenzionalni izraz za očuvanje mase

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial \hat{t}} + \left(\frac{u_o \tau}{L} \right) \hat{u} \frac{\partial \hat{P}}{\partial \hat{x}} + \left(\frac{\beta u_o \tau}{P_o L} \right) \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}} = 0 \quad (3.39)$$

Isto tako kombiniranjem jednadžbi stanja s bezdimenzionalnom jednadžbom momenta, može se napisati sljedeći izraz za očuvanje momenta tekućine

$$\left(\frac{1}{\hat{\rho}} + \frac{\rho_o u_o^2}{\beta} \hat{u}^2 \right) \frac{\partial \hat{P}}{\partial \hat{x}} + \left(\frac{\rho_o u_o L}{\tau P_o} \right) \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}} + \left(\frac{\rho_o u_o L}{\tau \beta} \right) \hat{u} \frac{\partial \hat{P}}{\partial \hat{t}} + \left(\frac{\rho_o u_o^2}{P_o} \right) \frac{\partial (\hat{u}^2)}{\partial \hat{x}} = 0 \quad (3.40)$$

Ako su zadovoljeni sljedeći omjeri karakterističnih dimenzija:

$$\frac{u_o \tau}{L} \ll 1 \ll \frac{\beta}{P_o} \quad \frac{\rho_o u_o^2}{P_o} \ll 1 \ll \frac{\rho_o u_o L}{\tau P_o} \quad \text{i} \quad (3.41)$$

nakon toga se uvrštava u jednadžbe 3.39 i 3.40 te se bezdimenzionalne jednadžbe količine gibanja mase i momenta smanje na sljedeće oblike

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{P}}{\partial \hat{t}} + \left(\frac{\beta u_o \tau}{P_o L} \right) \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}} &= 0 \quad \text{masa} \\ \frac{\partial \hat{P}}{\partial \hat{x}} + \left(\frac{\rho_o u_o L}{\tau P_o} \right) \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}} &= 0 \quad \text{moment} \end{aligned} \quad (3.42)$$

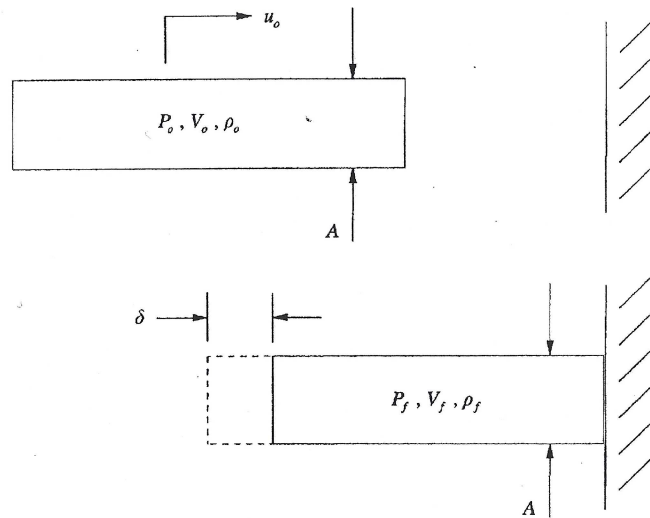
Jednadžba 3.42 vrijedi samo za situacije u kojima jednadžba 3.41 zadovoljava. Pod tim uvjetima, brzina tekućine je uglavnom mala i prijelazne pojave unutar hidrauličkih cijevi se javljaju kratko vrijeme. Ovaj rezultat prikazuje značenje bezdimenzionalne analize. Bez ove vrste analize, ne bismo bili u stanju eliminirati nevažne uvijete u jednadžbama i jednadžbe količine gibanja mase i momenta bi ostale kao jednadžbe 3.39 i 3.40.

3.9.3. HIDRAULIČKI UDAR

Hidraulički udar ili vodeni čekić je fenomen koji se javlja unutar hidrauličkih cjevovoda kada tekućina naglo promjeni brzinu. Ova promjena u brzini uzrokuje tlačni val unutar cijevi i često stvara buku koja je slična udaranju čekića po cijevi. Željeni rezultat analize za hidraulički udar je maksimalni tlak, jer smanjenje tlaka hidrauličnog udara izravno smanjuje poteškoće uzrokovane njime, to su buka i pucanje cjevovoda. Slika 3.19 prikazuje stupac tekućine koji se približava krutoj granici brzinom u_o . Kinetička energija se dobiva

$$KE = \frac{1}{2} M u_o^2 = \frac{1}{2} \rho_o V_o u_o^2 \quad (3.43)$$

gdje je M masa stupca tekućine, ρ_o je početna gustoća stupca tekućine i V_o je početni volumen stupca tekućine.



Slika 3.19: Nagla promjena brzine stupca tekućine

Kada stupac tekućine udari u krutu prepreku, brzina tekućine iznenada padne na nulu i stupac tekućine se deformira da preuzme energiju koju je imao u gibanju. Budući da je tekućina jako malo stišljiva, deformacija je mala, a energija pohranjena unutar medija, tijekom procesa deformacije se ponaša slično kao mehanička opruga. Potencijalna energija pohranjena u stupcu komprimirane tekućine je

$$PE = \frac{1}{2} \frac{V_o}{\beta} (P_f - P_o)^2 \quad (3.44)$$

Maksimalni tlak fluida unutar stupca tekućine uslijed naglog zaustavljanja protoka je

$$P_f = P_o + u_o \rho_o c \quad (3.45)$$

gdje je c brzina zvuka u tekućem mediju dana s

$$c = \sqrt{\beta / \rho_o} \quad (3.46)$$

Vidljivo da je maksimalni tlak hidrauličnog udara rezultat samo početne brzine tekućine. Taj rezultat ne ovisi o duljini stupca tekućine, a time je jedina prilagodba inženjera za smanjenje hidrauličnog udara je smanjenje početne brzine tekućine. Za zadani volumenski protok, to se može učiniti odabirom cijevi većeg poprečnog presjeka.

3.10. PODMAZIVANJE

U tribološkim sustavima, tekuća maziva se koriste da odvoje čvrstu kliznu površinu koja ima nižu posmičnu čvrstoću od površina sustava. To omogućuje jednostavno klizanje bez oštećenja kliznih površina.

Naginjanje ležaja

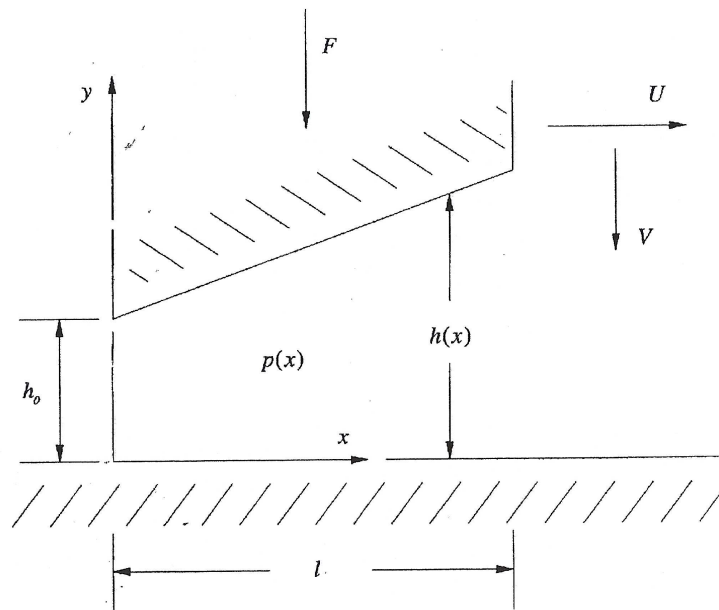
Slika 3.20 prikazuje nagnuti jastuk ležaja u odnosu na ravnu i nepomičnu kliznu plohu. Brzina u smjeru x je označena s U , a brzina u negativnom smjeru y je označena s V . Tlak tekućine varira u smjeru osi x između dvije površine.

Jednadžba za tlak fluida između dvije površine glasi

$$p(x) = \frac{x[h_o^2(P_l - P_o)(2h_o + mx) + 6l(mU + 2V)(l-x)\mu]}{l(2h_o + ml)(h_o + mx)^2} + \frac{h_o^2 P_o + mx(2h_o + mx)P_l}{(h_o + mx)^2} \quad (3.47)$$

Nosivost tekućine između dvije površine prikazana na slici 3.20 definirana je s

$$F = \int_0^l p(x) dx = \frac{6(mU + 2V)\mu}{m^3} \ln\left(1 + \frac{lm}{h_o}\right) + \frac{l[lm^3 P_l + h_o m^2(P_l + P_o) - 12(mU + 2V)\mu]}{m^2(2h_o + lm)} \quad (3.48)$$



Slika 3.20: Podmazivanje nakošenog jastuka ležaja

Sažetak

Prethodne jednadžbe prikazuju tlak i opterećenje karakteristično za naginjanje jastučića ležaja kako je prikazano na slici 3.20. Za većinu problema podmazivanja, nagib ležaja je veoma malen te se stoga taj učinak može pisati u vidu prvog i drugog Teylorovog reda. Korištenjem ove tehnike, tlak i nosivost za male vrijednosti nagiba mogu biti izražene kako je prikazano sljedećim jednadžbama.

$$p(x) = P_o + \underbrace{\frac{[2h_o + 3m(l-x)]x}{2h_o l}}_{\text{Hidrostatičko}} (P_l - P_o) + \underbrace{\frac{3m(l-x)x\mu}{h_o^3}}_{\text{Hidrodinamički}} U + \underbrace{\frac{3(l-x)[2h_o - m(l+4x)]x\mu}{h_o^4}}_{\text{Film podmazivanje}} \quad (3.49)$$

$$F = \underbrace{\frac{l}{2}(P_i + P_o) + \frac{l^2 m}{4 h_o}(P_i - P_o)}_{\text{Hidrostatičko}} + \underbrace{\frac{l^3 m \mu}{2 h_o^3} U}_{\text{Hidrodinamičko}} + \underbrace{\frac{l^3 (2 h_o - 3 l m) \mu}{2 h_o^4} V}_{\text{Film podmazivanje}} \quad (3.50)$$

Iz ovih jednadžbi se može vidjeti da su tri vrste podmazivanja prisutne u procesu podmazivanja.

Prvi tip se zove hidrostatičko podmazivanje i neovisno je o brzini. Ova vrsta podmazivanja je rezultat tlaka koji ima tendenciju da fluid gura kroz prazninu. Tok koji izlazi iz gradijenta hidrostatskog tlaka naziva se Poiseuille tok, i to podmazivanje postaje nezavisno o debljini filma tekućine. Svejedno, mora se imati na umu da određena debljina filma tekućine mora biti prisutna.

Drugi tip podmazivanja naziva se hidrodinamičko podmazivanje, te se pokazalo da je izravno povezano s brzinom klizanja dvije površine. Zbog relativnih brzina klizanja površina generira se protok, koji povlači tekućinu u procijep između površina. Ova vrsta podmazivanja nije djelotvorna ako su površine paralelne, to jest $m \neq 0$. Također treba napomenuti da ovo podmazivanje uvelike ovisi o debljini filma.

I treći tip podmazivanja je poznat kao film podmazivanje. Ovo podmazivanje proizlazi iz relativne brzine površina u smjeru y , što stvara efekt cijedenja filma tekućine. Ovo podmazivanje ne ovisi o paralelnosti površina, ali ostaje ovisna o debljini filma tekućine.

4. PRIMJERI I MOGUĆNOSTI PRIMJENE HIDRAULIKE S VODOM KAO MEDIJEM

Prvi podaci o korištenju vodne hidraulike potječu iz Mezopotamije i starog Egipta. Tamo su već 6000 godina prije Krista koristili kanale za navodnjavanje. Jedan od najstarijih strojeva pokretanih vodom je sat, korišten u 2. tisućljeću prije Krista. U Europi se je hidraulika razvila pod okriljem Rimskog Carstva, koji su gradili sustave vodovoda. Vjerojatno prvi primjer korištenja vodenog kotača je Perachor-ovo kolo iz 3. st. Oko 1600. pojavile su se pumpe, pa snaga vode više nije ovisila o prirodi. Sredinom 18. st. počele su se koristiti klipne pumpe za vodu u rudnicima. Krajem 18. st. je voda prvi put upotrebljena u hidrauličkoj preši. 1858. se voda koristila u oko 1200 strojeva instaliranih u Engleskoj. To su bile dizalice, dizala i mostovi. U izvornoj verziji je i Tower Bridge u Londonu bio pokretan snagom vode. Kasnije kor rekonstrukcije mosta u 20. st. su vodu zamijenili uljem. Nakon toga su se pojavila mineralna ulja koja su gotovo u potpunosti istisnula vodu iz hidrauličkih sistema.

Krajem 20. st. ponovno se uviđaju prednosti vode te se počinje koristiti u sve više aplikacija. Jedni od prvih primjena korištenja tekućina na bazi vode u hidraulici u novije vrijeme su:

CWS Company	Proporcionalna kontrola tlaka za robotsko zavarivanje na automobilskoj tekućoj vrpici
--------------------	--

Primjena vodene hidraulike zamjenjuje pneumatsku kontrolu robotskih zavarivača na automobilskoj proizvodnoj liniji. Želja proizvođača je postizanje bolje kvalitete točkastog zavara kroz veću brzinu i kontrolu sile pritiska elektrode. Dodatne koristi su smanjenje buke, uklanjanje sustava hlađenja elektroda, smanjeno vrijeme vara i produženi vijek elektroda.

Swagelok	Vodena hidraulika u obradi fotografskih traka
-----------------	--

Velikim proizvođačima fotografskih filmova potrebni su specijalni strojevi za dizanje i odlaganje bačvi tekućine za obradu filma teških oko 3628 kg (8000 pound). Jedna kap hidrauličnog ulja mogla je uništiti svu tekućinu i proizvesti gubitak od oko 100.000 dolara, tako da se koristi čista voda u sustavima.

Vodena hidraulika na offshore platformama

Vodena hidraulika se koristi na offshore platformama već dugi niz godina. U početku je razlog bio nezapaljivost vode i zaštita od pada jer je ulje klizavo ako se razlije.

Povećanjem svijesti o zaštiti okoliša u posljednjih 20 godina došlo je do značajnog porasta korištenja tekućina na bazi vode, na offshore platformama i u sustavima u podmorju.

Ovaj trend je rezultirao da danas gotovo sve platforme koriste tekućine na bazi vode.

Ipak, danas je najčešća primjena vodene hidraulike na branama. Najčešće se primjenjuje u hidroelektranama. Koristi se za podizanje velikih zasuna koje propuštaju vodu u turbinu. Neposredno prije turbine su usmjerivači koji reguliraju točan protok vode prema turbini te su i oni upravljani cilindrima s vodom kao fluidom. Također se i kut lopatica kontrolira od strane cilindra pokretanih vodom. Cijeli sustav se obično opskrbljuje iz centralnog sustava velike snage. Vodena hidraulika na branama i ustavama koristi prije svega zbog mogućih velikih zagađenja vode uslijed curenja tekućine iz sustava.

Neki od primjera primjene vodne hidraulike na branama u Europi su sljedeći:



*Slika 4.1: Kläggen, Švedska
– sustav upravljanja segmentnim zatvaračima
za kontrolu razine jezera*



*Slika 4.2: Naussac, Francuska – sustav
upravljanja glavnim zatvaračem dovoda vode
na turbinu i lopatice privodnog kola*



*Slika 4.3: Ottendorf, Germany - zaštitna vrata
za punjenje i pražnjenje odvodnog kanala*



*Slika 4.4: Bångbro, Sweden - kontrola dovoda
vode na turbinu*

Najveće mogućnosti primjene vode u hidrauličkim sustavima su u sljedećim industrijama. Metalurgija i lijevanje metala, offshore platforme, prehrambena industrija, rudarstvo, hidroenergija, nuklearne tehnologije, desalinizacijska postrojenja, tehnologija otpadnih voda, ovlaživanje prostora i unutarnji plovni putovi.

5. PROIZVOĐAČI OPREME ZA HIDRAULIKU S VODOM KAO MEDIJEM

Tržišna bitka u ovom segmentu je sve teža. Na tržištu je sve veći broj tvrtki koje nude komponente za hidrauličke sustav. Većina tvrtki dolazi iz sjeverne Europe gdje je svijest o zaštiti okoliša najrazvijenija. Ovdje su predstavljeni proizvodi tvrtki koje se prije svega bave isključivo vodenom hidraulikom, te koje su poznate na tržištu hidraulike.



The Water Hydraulics Co Ltd

Pumpe

Potpuno bez ulja, čiste i potpuno sigurne za ljude, procese i proizvode. Kao rezultat korištenja naprednih materijala, dobivamo velike brzine i učinkovite klizne površine koje učinkovito rade samo s vodom kao sredstvom za hlađenje i podmazivanje. Proizvodi se odlikuju malom težinom. Proizvedene su od nehrđajućih čelika AISI 316 nude izvrsnu otpornost na koroziju. Materijali se mogu odabrati tako da ne odgovaraju samo vodi iz slavine, nego i za korištenje morske vode i drugih tekućina.



max broj okretaja (°/min)	1800 - 2000
najveća ulazna snaga (kW)	0,55 - 114
max. protok vode (l / min)	2,4 - 430
max tlak (bar)	100 - 160
masa(kg)	1,5 - 82
max Temperatura (° C)	50 - 90
min	2

Motori



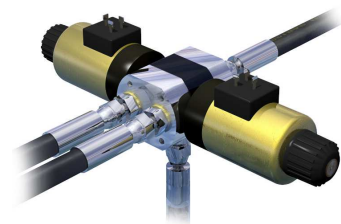
max broj okretaja (°/min)	2000 - 4000
Najveća ulazna snaga (kW)	2,7 - 108
Max. protok vode (l / min)	12 - 430
Max tlak (bar)	160
Težina (kg)	1,5 - 82
max Temperatura (° C)	50 - 90
min	2

Ventili

4-2 / 3-2 / 4-3

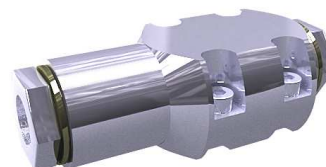
Dizajnirani za kontrolu smjera strujanja korozivnih tekućina u hidrauličkim sustavima.

Dizajnirani za tekućine s niskom viskoznošću, te nude veliku učinkovitost i malu energiju potrebnu za pokretanje.



Nepovratni ventili

Dostupni kao 4/3 i 4/2 ventili ili kao pojedinačni ventili. Nepovratni ventili nude 100% siguran rad za opterećenje sustava.



Cilindri

Konstrukcija s povezanim šipkama nudi veću trajnost od zavarenih, te nudi visoku otpornost na koroziju.

Maksimalna brzina ovisi o korištenim materijalima i brtvama.

Koriste se standardni AISI 316 čelici, a s dodatnim keramičkim premazima mogu se pripremiti za ekstremno okruženje.



Danfoss A/S



Nessie® hidraulički asortiman nudi niz pogodnosti:

- ne onečišćuje okoliš
- kompaktne komponente štede prostor
- jednostavno čišćenje komponenti
- dugi radni vijek
- voda je lako dostupna
- nema rizika od požara



Pumpni agregati

- dizajn prilagođen snazi i standardima
- mogu se montirati ventili standardnog napajanja
- modularni ventili odgovaraju pojedinačnim postrojenjima
- kompaktni i jednostavni za ugradnju
- konstruirani da koriste vodu iz slavine
- dugi radni vijek bez održavanja
- protok za standardne verzije od 1,3 do 220 l/min
- maksimalni tlak za standardne verzije do 160 bar



Pumpe

Pumpe su dizajnirane da opskrbljuju sustav vodom pod visokim tlakom na temelju aksijalno klipnog principa, zahvaljujući čemu su vrlo lagane i kompaktne.

Konstrukcija omogućuje podmazivanje samo s vodom. Svi su dijelovi dizajnirani za dugi vijek trajanja.

- geometrijska dobave od 2 do 80 cm³/n
- protok od 3 do 112 l/min
- snaga do 33 kW
- radni tlak do 160 bar

Ventili

Konstruirani su za korištenje vode iz slavine iz slavine i tlakove do 210 bara.

- protočni ventili
 - protok od 2 do 30 l/min
- tlačni ventili
 - protok od 15 do 120 l/min
- regulacijski ventili
 - 2/2, 4/2 i 4/3 konfiguracije
 - protok do 120 l/min
- magnetni ventili ON/OFF
 - protok do 150 l/min



Motori



Tip motora		MAH	MVM
Geometrijska dobava	cm ³ /n	4 - 12,5	160
Brzina	n/min	300 - 4000	15 - 200
Max okretni moment	NM	8 - 25	100
Snaga	kW	do 8	do 2,5
Tlak	bar	do 140	do 50

Cilindri

Dizajnirani su za korištenje vodene hidraulike na temelju postojećih dokazanih tehnologija.

Izrađeni su od nerđajućeg čelika.

Standardnim cilindrima promjer varira od 35 - 80 mm, a hod od 100 - 2000 mm



Pumpni agregati

tlak do 800 bar
protok do 1000 l/min
snaga do 400 kW



Ventili

Usmjereni regulacijski ventili
Protočni ventili
Tlačni ventili
Proporcionalni ventili
Sustavi ventila
Kontrolna dinamika



- tvornica pumpi i kompresora



DP 200

- tlak do 1000 bar
- broj okretaja do 657 1/min
- protok do 2000 l/min



DP 400

- tlak do 1000 bar
- broj okretaja do 820 1/min
- protok do 2000 l/min

Ventili

- tlak do 800 bar
- čvrsta konstrukcija
- zračno upravljanje ventila



Specijalni cilindri



Specijalni hidraulički sustavi



6. ZAKLJUČAK

U radu je obrađeno korištenje vode kao medija u hidrauličkim sustavima. Iako se voda koristi od davnina za dobivanje energije, primjena u hidrauličkim sustavima je relativno nova. Glavni razlozi korištenja vode su ekološki. Voda je iz prirode i kao takva nema štetnog utjecaja u slučaju izlivanja te nije potrebno zbrinjavanje nakon upotrebe. Dobro svojstvo vode je i nezapaljivost. Taj razlog je često važniji u izboru tekućine za hidraulički sustav.

Svojstva strujanja su različita od strujanja ulja, dok su principi rada hidrauličnog sustava jednaki u oba slučaja. Najvažnije svojstvo kod kojeg su ujedno i najveće razlike je viskoznost. Voda ima jako malu viskoznost, što je dobro zbog malih gubitaka strujanja kroz cijevi i komponente sustava. To rezultira manjom potrebnom snagom pumpe za medij. S druge strane je mala viskoznost stvarala najviše problema inženjerima kod izrade komponenti za korištenje vode u hidraulici. Brtve i komponente se moraju jako precizno izraditi, s malom zračnosti. Zbog toga tek u novije vrijeme imamo komponente za vodu koje konkuriraju uljnoj hidraulici. Razlog je što se tek razvojem tehnike obrade materijala i novim strojevima mogu izraditi tako precizni dijelovi. Velike probleme je stvarala i korozivnost vode. Rješavanje tog problema također možemo zahvaliti razvoju novih materijala i prevlaka. Korištenjem keramičkih prevlaka i samopodmazujućih brtva je otklonjen i problem podmazivanja. Poznato je da voda nema dobra maziva svojstva. Novom generacijom komponenti za vodenu hidrauliku otklonjeni su svi problemi koji su sprječavali korištenje vode u hidrauličkim sustavima. Danas postoje komponente koje mogu zamijeniti uljnu hidrauliku u gotovo svim aplikacijama. Početni veliki investicijski troškovi u hidraulički sustav za rad s vodom se kompenziraju smanjenim troškovima fluida. Nakon određenog broja sati potrebno je mijenjanje fluida u sustavu. Dok je cijena ulja puno veća, potrebno ga je i zbrinuti nakon vijeka korištenja. Kod vode u ovi troškovi gotovo zanemarivi jer se može natočiti iz slavine, a također se u većini slučajeva može ispustiti u kanalizaciju. Samim time je korištenje vode u hidrauličkim sustavima postalo konkurentno ulju.

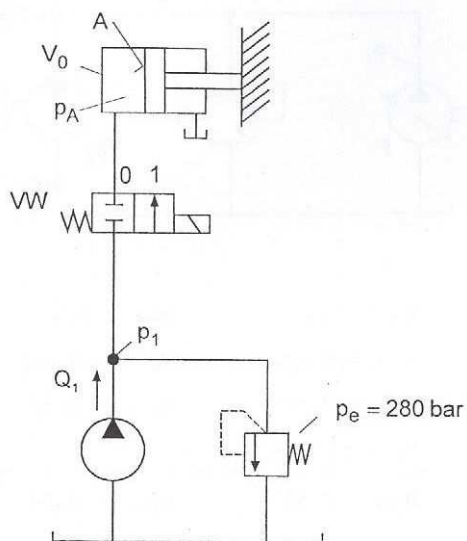
Vodena hidraulika već pronalazi primjenu u industriji te se to područje širi. Kako raste svijest o okolišu tako rastu i troškovi zbrinjavanja otpadnih ulja, a samim time voda postaje sve prihvatljivija. Svojstva rada sustava s vodom ne zaostaju za uljem, a čak su neka svojstva i bolja. Potrebno je manje energije za pokretanje a odzivi sustava su brži zbog manje stišljivosti. Samim time voda postaje sve zanimljiviji medij u hidraulici.

7. LITERATURA

- [1] "Water Hydraulics - A Status Report" od strane odbora za vodenu hidrauliku od NFPA - National Fluid Power Association
http://www.nfpa.com/OurIndustry/OurInd_AboutFP_WhatsAvailableInWH.asp
- [26] Modern Water Hydraulics-Your Choice for the Future, NFPA, Finska 1995
http://www.nfpa.com/ourindustry/ourind_aboutfp_introtowaterhydraulics.asp
- [3] Modern Water Hydraulics - Your Choice for the Future, National Fluid Power Association - NFPA, USA,1995.
- [4] Manning N. D., Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons, 2005.
- [5] Savić V., Uljna hidraulika, Dom štampe, Zenica 1990.
- [6] Bašta T. M., Mašinska hidraulika, Mašinski fakultet Beograd, 1986.
- [7] The Water Hydraulics Co Ltd
<http://www.waterhydraulics.co.uk/new2/>
- [8] Danfoss Nessie
<http://www.danfoss.com/>
- [9] Hauhinco Water Hydraulics Ltd
<http://www.hauhinco.com/>
- [10] WEPUKO-HYDRAULIK GmbH
<http://www.wepuko.de/>
- [11] BOC Water Hydraulics Inc.
<http://www.bocwaterhydraulics.com/>

8. PRILOG

Primjer 1.



Zadano:

$$V_0 = 20 \text{ dm}^3 = 0,02 \text{ m}^3$$

$$Q_1 = 50 \text{ dm}^3 / \text{min}$$

$$p_{A0} = 10 \text{ bar}$$

$$K_{oil} = 1,64 \cdot 10^4 \text{ bar}$$

$$K_{H_2O} = 2,27 \cdot 10^4 \text{ bar}$$

Traženo:

1. Koliki je volumen ΔV potreban da tlak otvaranjem ventila poraste s 10 bar na 280 bar?

2. Koliko je vremena potrebno nakon otvaranja ventila da tlak poraste na 280 bar?

Traženo izračunati za primjer korištenja vode i ulja.

Rješenje:

$$1. \quad \Delta p = K \cdot \frac{\Delta V}{V_0} \Rightarrow \Delta V = \Delta p \cdot \frac{V_0}{K}$$

$$\Delta V_{oil} = 3,29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 0,329 \text{ l} \quad \Delta V_{H_2O} = 2,38 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 0,238 \text{ l}$$

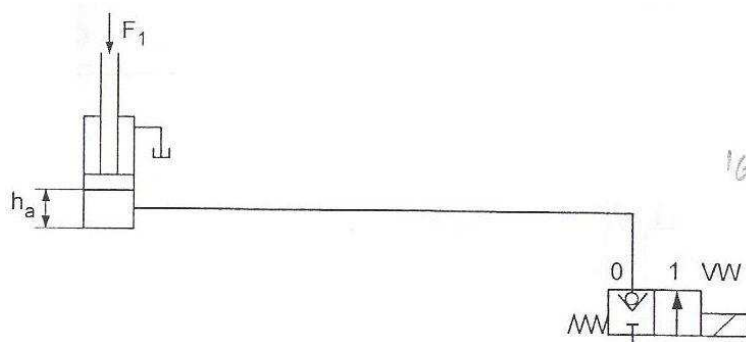
$$2. \quad t = \frac{\Delta V}{Q_1}$$

$$t_{oil} = 0,40 \text{ s} \quad t_{H_2O} = 0,29 \text{ s}$$

Zaključak:

Iz prikazanog zaključujemo da je kod korištenja vode kao fluida vrijeme reakcije sustava gotovo 30% kraće nego kod korištenja ulja kao fluida.

Primjer 2.



Zadano:

Povećanje sile s $F_1 = 100 \text{ kN}$ do $F_2 = 200 \text{ kN}$

Hlađenje ulja s $\vartheta = 60^\circ \text{C}$ na $\vartheta = 20^\circ \text{C}$

Početni položaj kod F_1 : $h_a = 200 \text{ mm}$

Promjer klipa: $D_k = 100 \text{ mm}$

Cjevovod: $l = 8 \text{ m}$, $C_{ijev} = 14 \times 1,5 \text{ mm}$

Ukupna učinkovitost: $\eta = 1$

Traženo:

1. Odrediti promjenu h_{aL} rezultiranu promjenom tlaka.
2. Odrediti promjenu h_{aT} rezultiranu promjenom temperature.
3. Odredite ukupnu količinu smanjenja.

Napomena:

Koristite sljedeće jednadžbe kod rješavanja:

$$\Delta h = \Delta F / c$$

$$\Delta V = V \cdot \beta_\vartheta \cdot (\vartheta - \vartheta_0)$$

$$K_{oil} = 1,73 \cdot 10^4 \text{ bar}$$

$$K_{H_2O} = 2,22 \cdot 10^4 \text{ bar}$$

$$\beta_{\vartheta oil} = 7 \cdot 10^{-4} / \text{K}$$

$$\beta_{\vartheta H_2O} = 3,39 \cdot 10^{-4} / \text{K}$$

Rješenje:

$$1. \quad \Delta h = \frac{\Delta F}{c} = \frac{(F_1 - F_2) \cdot V_0}{K \cdot A_K^2}$$

$$c_{oil} = 613,66 \text{ kN/cm}$$

$$h_{aL(oil)} = 0,163 \text{ cm}$$

$$c_{H_2O} = 787,47 \text{ kN/cm}$$

$$h_{aL(H_2O)} = 0,127 \text{ cm}$$

$$2. \quad h_{aT} = \frac{\Delta V}{A} \quad \Delta V = V_o \cdot \beta_\vartheta \cdot \Delta \vartheta$$

$$\Delta V_{oil} = 48,69 \text{ cm}^3$$

$$h_{aT(oil)} = 0,620 \text{ cm}$$

$$\Delta V_{H_2O} = 25,55 \text{ cm}^3$$

$$h_{aT(oil)} = 0,300 \text{ cm}$$

$$3. \quad h_a = h_{aL} + h_{aT}$$

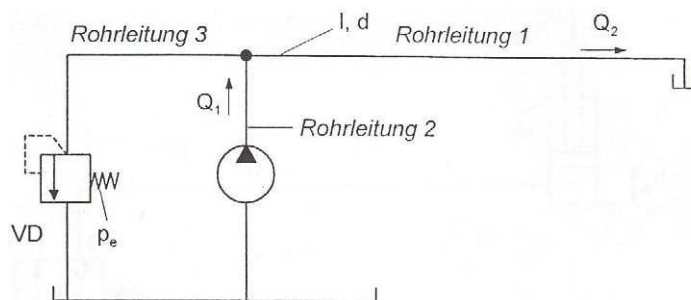
$$h_{a(oil)} = 0,783 \text{ cm}$$

$$h_{a(H_2O)} = 0,427 \text{ cm}$$

Zaključak:

Iz ovog se primjera zaključuje da voda kao fluid ima oko 45% manje toplinske gubitke i stišljivost od ulja. To znači da će se javljati manja odstupanja od upravljanja.

Primjer 3.



Zadano:

Na prikazanoj slici je slobodni protok na kraju cijevi $Q_2 = 30 \text{ dm}^3/\text{min} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Cjevovod 1: $l = 8 \text{ m}$ $A_T = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$
 $14 \times 1,5 \text{ mm}$
 $a = 14 \text{ mm} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ $D_e = \frac{2ab}{(a+b)} = 2,71 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
 $b = 1,5 \text{ mm} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $A_e = 5,77 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

Tlakovi u kratkim cjevovodima 1 i 2 se zanemaruju.

Pumpa: $Q_{\text{eff}} = 50 \text{ dm}^3/\text{min} = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, $\eta_1 = 0,82$

Hidrauličko ulje:

$$v = 45,5 \text{ mm}^2/\text{s} = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\rho = 0,88 \text{ kg/dm}^3$$

Voda:

$$v = 1,009 \text{ mm}^2/\text{s} = 1,009 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\rho = 1 \text{ kg/dm}^3$$

Temperatura je konstantna.

Traženo:

1. Pronađite tlak p_e na koju treba namjestiti ventil za rasterećenje?
2. Kolika snaga P_1 mora biti isporučena crpki?

Rješenje:

1.

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad v = \frac{Q}{A_T} \quad Re = \frac{v D_e}{\nu}$$

za $Re < 2300$ $\lambda = \frac{64}{Re}$
za $Re > 2300$ $\lambda = 0,3164 Re^{-0,25}$

hidrauličko ulje:

$$v = 15,71 \text{ m/s}$$

$$Re = 946$$

$$\lambda = 0,068$$

$$\Delta p = 218 \text{ bar}$$

voda:

$$v = 15,71 \text{ m/s}$$

$$Re = 42195$$

$$\lambda = 0,022$$

$$\Delta p = 80,42 \text{ bar}$$

2.

$$P_{izu} = \frac{Q_{\text{eff}} \cdot P_e}{\eta_1}$$

hidrauličko ulje:

$$P_{izu} = 22 \text{ kW}$$

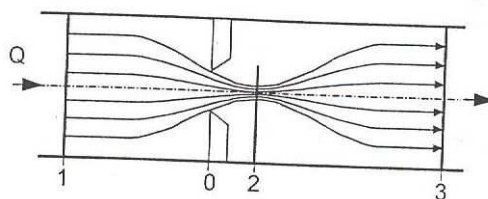
voda

$$P_{izu} = 8,14 \text{ kW}$$

Zaključak:

korištenjem vodene hidraulike je potrebna manja snaga motora pumpe zbog toga što voda ima manju viskoznost, a samim time i manje otpore strujanja kroz sustav.

Primjer 4.



Zadano:

Prikazan je oblik poprečnog suženja cijevi, za suženje toka u točki 2 na $A_2 = 0,1 \cdot A_1$

Brzina je $v_1 = 3 \text{ m/s}$

Gustoća ulja je $\rho = 880 \text{ kg/m}^3$

Traži se:

1. Odredite razliku tlaka $p_1 - p_2$ za slobodni protok.
2. Koliki je koeficijent kontrakcije α_K kod $d_1 = 20 \text{ mm}$ i $d_0 = 8 \text{ mm}$?
3. Koliki pad tlaka $\Delta p = p_1 - p_3$ se formira uz koeficijent protoka $\alpha_D = 0,8$?

Rješenje:

$$1. \quad p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad i \quad Q_1 = Q_2 \Rightarrow v_1 A_1 = v_2 A_2 \Rightarrow v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} = \frac{v_1}{0,1} = 30 \text{ m/s}$$

Hidrauličko ulje:

$$\Delta p_{oil} = p_1 - p_2 = 3,92 \text{ bar}$$

Voda:

$$\Delta p_{H_2O} = p_1 - p_2 = 4,46 \text{ bar}$$

$$2. \quad A_1 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \Rightarrow Q = 9,42 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow A_2 = 3,14 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$A_0 = 5,02 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\alpha_K = \frac{A_2}{A_0} = 0,625$$

$$3. \quad Q = \alpha_D \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p} \Rightarrow \Delta p = \frac{Q^2 \cdot \rho}{2 \cdot \alpha_D^2 \cdot A_0^2}$$

Hidrauličko ulje:

$$\Delta p_{oil} = p_1 - p_3 = 2,42 \text{ bar}$$

Voda:

$$\Delta p_{H_2O} = p_1 - p_3 = 2,75 \text{ bar}$$

Zaključak:

Iz ovoga se vidi da voda ima veći pad tlaka na preprekama zbog veće gustoće.

Primjer 5.

U obrani od požara u hidrauličkim sustavima koriste se hidraulička ulja HLP 46 u HFD tekućini. Dijagram ovisnosti viskoznosti o temperaturi pokazuje svojstva obje tekućine.

Zadano:

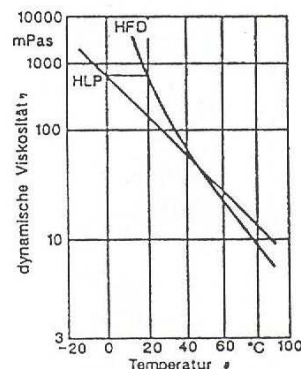
$$\text{HLP 46: } \rho_{\text{HLP}} = 0,878 \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{HFD: } \rho_{\text{HFD}} = 1,350 \text{ kg/dm}^3$$

$$p_{\text{tank}} = 1 \text{ bar}$$

$$Q_1 = 80 \text{ dm}^3/\text{min}$$

$$\text{radna temperatura } \vartheta = 45^\circ \text{C}$$



Traži se:

- Dopušteni temperaturni raspon sustava se određuje minimalnom i maksimalnom viskoznošću. On za HLP iznosi $80^\circ \text{C} \geq \vartheta \geq 0^\circ \text{C}$. U kojem temperaturnom rasponu mogu raditi sustavi s HFD?
- Pumpa usisava kroz kratku usisnu cijev ($D_i=24 \text{ mm}$) i usisni filtar ($\sum \zeta=7,2$). Ulaz usisne cijevi je ispravno zaobljen. Koliki je usisni tlak p_s na pumpi tijekom rada s HLP i HFD?
- Koliki mora biti promjer usisnog kanala da bude isti koeficijent otpora ζ i pad tlaka kao kod korištenja mineralnog ulja?

Rješenje:

- Iz dijagrama isčitamo vrijednosti viskoznosti za HLP za $\vartheta=80^\circ \text{C}$ i $\vartheta=0^\circ \text{C}$.

Za istu viskoznost isčitavamo iz dijagrama da je temperaturno područje za HFD $70^\circ \text{C} \geq \vartheta \geq 20^\circ \text{C}$

- Proširena Bernoullijeva jednadžba za (1) do (2)

$$p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_s + \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \left(\sum \lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \right) \cdot v_2^2$$

Nadalje, zbog kratkih ulaznih cjevovoda je:

$$\sum \lambda \cdot \frac{l}{d} = 0$$

$$\text{Također vrijedi: } v_1 = 0 \quad h_1 = h_2 \quad p_1 = p_{\text{Tank}} = 1 \text{ bar}$$

$$v_2 = \frac{Q_1}{A_i} = 2,95 \text{ m/s}$$

$$p_s = p_{\text{Tank}} - \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 + \sum \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 \right)$$

$$\text{HLP 46: } p_s = 0,68 \text{ bar}$$

$$\text{HLD: } p_s = 0,52 \text{ bar}$$

- $\Delta p_{\text{usis}} = \left(1 + \sum \zeta \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 \quad \zeta = \text{konst.}; \quad Q = \text{konst.}$

$$\rho_{\text{HLP}} \cdot v_{\text{HLP}}^2 = \rho_{\text{HFD}} \cdot v_{\text{HFD}}^2$$

$$d_{\text{HLD}} = d_{\text{HLP}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{HLD}}}{\rho_{\text{HLP}}}}$$

$$d_{\text{HFD}} = 26,7 \text{ mm}$$

Zaključak: Kada se koristi HFD kao medij usisni tlak mora biti manji zbog pojave kavitacije. HFD- tekućina na bazi vode, koristi se u sustavima gdje postoji opasnost od požara.

Primjer 6.

Pumpa maziva u zrakoplovu se opskrbljuje iz spremnika. Tijekom penjanja na visinu leta od 16000 m, inercijske sile koje djeluju na tekućinu su okrenute prema gore (normalno opterećenje $n_y=2$). Gubici tlaka od strane lokalnih otpora se ne uzimaju u obzir.

Zadano:

$$Q_1 = 16 \text{ dm}^3 / \text{min}$$

$$p_T = 0,1035 \text{ bar} \quad (\text{za visinu od } 16000 \text{ m})$$

$$v_{oil} = 11 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$v_{H_2O} = 35 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

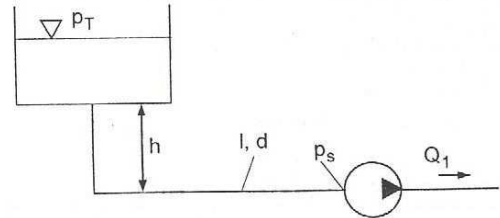
$$\rho_{oil} = 0,9 \text{ kg} / \text{dm}^3$$

$$\rho_{H_2O} = 1 \text{ kg} / \text{dm}^3$$

$$h = 0,7 \text{ m}$$

$$l = 2 \text{ m} \quad (\text{ukupna duljina usisnog cjevovoda})$$

$$d = 18 \text{ mm} \quad (\text{unutarnji promjer usisnog cjevovoda})$$



Traži se:

Koliko je apsolutni tlak p_{abs} na ulazu u pumpu tijekom penjanja na visinu leta?

Rješenje:

$$\text{Gubici trenja u cjevovodu} \quad \Delta p_R = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

$$\text{Gubici tlaka zbog inercijskih sila} \quad \Delta p_{TR} = n_y \cdot h \cdot \rho \cdot g \quad n_y = 2 \rightarrow \Delta p_{TR} = 2 \cdot h \cdot \rho \cdot g$$

$$\text{Geodetski tlak} \quad p_G = \rho \cdot g \cdot h$$

$$\text{Dakle, Bernoullijeva jednažba s } v_1 = v_2 = v \text{ je: } p_T + p_G - \Delta p_{TR} = p_s + \Delta p_R$$

$$p_T + \rho \cdot g \cdot h - 2h \cdot \rho \cdot g = p_s + \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

$$p_s = p_T + \rho \cdot g \cdot h - \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

	ulje	voda
$v = \frac{Q}{A}$	$v = 1,05 \text{ m/s}$	$v = 1,05 \text{ m/s}$
$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$	$Re = 1718 \rightarrow \text{laminarno}$	$Re = 540 \rightarrow \text{laminarno}$
$p_{Stau} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2$	$p_{Stau} = 0,00496 \text{ bar}$	$p_{Stau} = 0,00525 \text{ bar}$
$\Delta p_{TR} = 2 \cdot \rho \cdot g \cdot h$	$\Delta p_{TR} = 0,1236 \text{ bar}$	$\Delta p_{TR} = 0,1373 \text{ bar}$
$\Delta p_R = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$	$\Delta p_R = 0,0205 \text{ bar}$	$\Delta p_R = 0,0228 \text{ bar}$
$p_s = p_T - \frac{1}{2} \Delta p_{TR} - \Delta p_R$	$p_s = 0,0212 \text{ bar}$	$p_s = 0,0121 \text{ bar}$

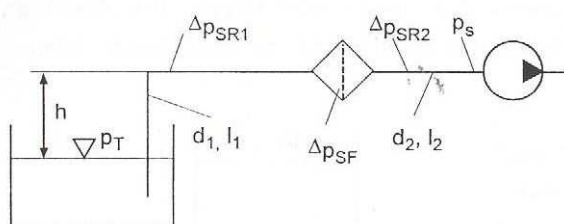
Tako niski tlakovi na ulazu pumpe nisu dopušteni. Rješenje je da se $p_T \uparrow, h \uparrow, d \uparrow$

Zaključak:

Voda kao medij je nepogodniji u ovakvim sustavima jer ima veću gustoću pa su padovi tlakova veći. Također je i tlak para popriločno visok, te je opasnost od pojave kavitacije kod rada s tako malim tlakovima povećana.

Primjer 7.

Pumpa za podmazivanje u zrakoplovu se opskrbljuje iz spremnika. Osim gubitaka uslijed trenja Δp_{SR1} i Δp_{SR2} u usisnim cijevima l_1 i l_2 pojavljuju se i gubici Δp_{SF} u usisnom filtru. Ostali padovi tlaka i lokalni gubici se ne uzimaju u obzir. Spremnik je pod tlakom $p_T=2$ bar.



Zadano:

$$Q_1 = 40 \text{ dm}^3/\text{min}$$

$$p_T = 2 \text{ bar}$$

$$\Delta p_{SF} = 1 \text{ bar}$$

$$\rho_{oil} = 0,9 \text{ kg/dm}^3$$

$$v = 30 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$\rho_{H_2O} = 1 \text{ kg/dm}^3$$

$$v_{H_2O} = 1,009 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$h = 0,7 \text{ m}$$

$$l_1 = 2 \text{ m}$$

$$l_2 = 0,5 \text{ m}$$

$$d = 18 \text{ mm} \text{ (unutarnji promjer usisnog crijeva)}$$

Traži se:

Koliki je tlak na ulazu u mazivu pumpu?

Rješenje:

$$p_T + \frac{\rho}{2} \cdot v_0^2 + \rho \cdot g \cdot h_0 = p_s + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h + \Delta p_{SF} + \sum \Delta p_{SR}$$

Uz $v_0=0$ i $h_0=0$

$$\rightarrow p_s = p_T - \frac{\rho}{2} \cdot v^2 - \rho \cdot g \cdot h - \Delta p_{SF} + \sum \Delta p_{SR}$$

	ulje	voda
$v = \frac{Q}{A}$	$v = 2,62 \text{ m/s}$	$v = 2,62 \text{ m/s}$
$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$	$Re = 1572 \rightarrow \text{laminarno}$	$Re = 46736 \rightarrow \text{turbolentno}$
$p_{Stau} = \frac{\rho}{2} v^2$	$p_{Stau} = 0,3089 \text{ bar}$	$p_{Stau} = 0,3432 \text{ bar}$
$p_G = \rho \cdot g \cdot h$	$p_G = 0,06180 \text{ bar}$	$p_G = 0,06865 \text{ bar}$
$\sum \Delta p_{SR} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$	$\sum \Delta p_{SR} = 0,175 \text{ bar}$	$\sum \Delta p_{SR} = 0,010 \text{ bar}$
	$p_s = 0,732 \text{ bar}$	$p_s = 0,578 \text{ bar}$

Zaključak:

Zbog manje viskoznosti vode linijski gubici u cjevovodu su manji nego kod ulja, ali zbog veće mase vode u cijevi potrebna je veća snaga pumpe da "vuče" vodu, te je zbog toga veći pad tlaka.