



Fakulteta za strojništvo

Doktorska disertacija

RAZISKAVA PRIMERNOSTI IONSKIH TEKOČIN ZA UPORABO V HIDRAVLIČNIH SISTEMIH

marec, 2015

Avtor: mag. Milan KAMBIČ

Mentor: izr. prof. dr. Darko LOVREC

Somentor: red. prof. dr. Jože BALIČ

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, izr. prof. dr. Darku Lovrecu za motivacijo, strokovno pomoč in vodenje pri opravljanju doktorske disertacije.

Zahvalo namenjam tudi somentorju, red. prof. dr. Jožetu Baliču, za strokovno usmerjanje in pomoč.

Posebna zahvala velja podjetju Olma d.d., ki mi je omogočilo študij.

Hvaležen sem podjetju Proionic GmbH v Grazu za posredovanje vzorcev ionskih tekočin ter prof. dr. Heinrichu G. Hochleitnerju iz Tehniške univerze v Grazu za strokovne nasvete in koordinacijo s podjetjem Proionic GmbH.

Zahvaljujem se tudi ženi Darji za moralno podporo in vzpodbudo.

KAZALO

KAZALO V

1 UVOD 1

1.1 Opis splošnega področja dela - razvoj hidravličnih tekočin.....	1
1.2 Opredelitev doktorske disertacije in teze	1
1.3 Struktura doktorske disertacije	3

2 VRSTE IN LASTNOSTI HIDRAVLIČNIH TEKOČIN 5

2.1 Idealna hidravlična tekočina.....	5
2.1.1 Naloge hidravlične tekočine	5
2.1.2 Osnovne vrste hidravličnih tekočin in zahteve.....	6
2.2 Kratek opis razvoja hidravličnih tekočin.....	10
2.3 Lastnosti hidravličnih tekočin	12

3 IONSKE TEKOČINE..... 15

3.1 Osnovne lastnosti ionskih tekočin	16
3.1.1 Tališče.....	16
3.1.2 Parni tlak.....	17
3.1.3 Toplotna kapaciteta in prenos topote	17
3.1.4 Viskoznost	18
3.1.5 Gostota.....	19
3.1.6 Stisljivost	19
3.1.7 Termično oksidacijska stabilnost in vnetljivost	20
3.1.8 Kemijska stabilnost	20
3.1.9 Sposobnost mazanja	20
3.1.10 Sposobnost zaščite pred korozijo.....	21
3.1.11 Vpliv na zdravje ljudi in okolje	22
3.2 Prednosti	22
3.3 Možnost uporabe v industriji.....	24
3.4 Ionske tekočine kot napredna maziva-stanje tehnike	25
3.4.1 Vpliv anionov in kationov na mazalne lastnosti.....	26

3.4.2 Uporaba nerazredčenih ionskih tekočin	29
3.4.3 Ionske tekočine kot aditiv	31
3.4.4 Aditivi za ionske tekočine.....	31
3.4.5 Ugotovitve o trenutnem stanju razvoja na področju maziv	32
3.5 Ionske tekočine kot hidravlične tekočine-stanje tehnike	33

4 LABORATORIJSKO PREIZKUŠANJE LASTNOSTI IONSKIH TEKOČIN 35

4.1 Običajne standardne meritve fizikalno kemijskih lastnosti ionskih tekočin.....	35
4.1.1 Določevanje plamenišča in točke gorenja v odprtih posodi; ASTM D 92	35
4.1.2 Določevanje plamenišča in točke gorenja v zaprtih posodi; ASTM D 93	37
4.1.3 Določevanje gostote s pomočjo merilnika gostote; ISO 12185	39
4.1.4 Določevanje kinematicne viskoznosti pri 40 °C in 100 °C; ASTM D 445	41
4.1.5 Določevanje indeksa viskoznosti	43
4.1.6 Določevanje korozije v vlažni komori; DIN EN ISO 6270-2.....	44
4.1.7 Določevanje korozivnosti na baker; ASTM D130.....	46
4.1.8 Določevanje deemulgirnih lastnosti; ASTM D 1401.....	48
4.1.9 Določevanje penjenja v mazalnih oljih; ASTM D 892.....	49
4.1.10 Določevanje točke zavaritve in premora obrabne kalote; IP 239-85	52
4.1.11 Določevanje točke tečenja; ASTM D 97	53
4.2 Posebne meritve fizikalno kemijskih lastnosti ionskih tekočin	54
4.2.1 Sposobnost filtracije; ISO 13357	55
4.2.2 Združljivost s celuloznim filtrirnim papirjem.....	60
4.2.3 Združljivost z barvnimi premazi	63
4.2.4 Meritev Stribeckove krivulje	64
4.2.5 Električna prebojna trdnost-IEC 156, IEC 60156.....	71
4.2.6 Kontaktni kot.....	74
4.3 Primerjava lastnosti ionskih tekočin z običajnimi hidravličnimi olji	78
4.4 Ocena primernosti uporabljenih standardnih laboratorijskih metod za preizkušanje ionskih tekočin	82

5 DOLOČANJE SPOSOBNOSTI ZAŠČITE PRED KOROZIJO 85

5.1 Korozijski test v vlažni komori.....	85
--	----

5.2 Korozivnost na baker.....	90
5.3 Korozija na zraku	91
5.4 Združljivost s sestavnimi deli hidravličnih sistemov	91
5.4.1 Vrsta in material uporabljenih sestavnih delov	92
5.4.2 Način izvedbe testa.....	93
5.4.3 Ocena združljivosti.....	95

6 MERJENJE STISLJIVOSTI HIDRAVLIČNIH TEKOČIN..... 97

6.1 Vpliv stisljivosti na delovanje hidravličnega sistema	100
6.1.1 Vpliv stisljivosti na hitrost širjenja zvoka	101
6.1.2 Nihanja in togost valjev	104
6.1.3 Vpliv na izkoristek črpalk in motorjev	106
6.1.4 Vpliv na snovanje regulacije in parametriranje regulatorja.....	107
6.2 Načini merjenja stisljivosti tekočin	108
6.2.1 Merjenje stisljivosti tekočin preko spremembe tlaka in prostornine.....	108
6.2.2 Merjenje stisljivosti tekočin preko hitrosti zvoka, ki se širi po tekočini	110
6.3 Naprava za merjenje stisljivosti	112
6.3.1 Hitri senzorji tlaka Piezotronics PCB 102B	115
6.3.2 Digitalni prikazovalnik tlaka WIKA DG-10-S.....	116
6.3.3 Tehnica KERN PCB 6000-1	116
6.3.4 Krmilnik Compact RIO	117
6.4 Postopek merjenja stisljivosti.....	118
6.5 Postopek računanja stisljivosti	119
6.5.1 Izračun stisljivosti iz spremembe tlaka in prostornine	119
6.5.2 Izračun stisljivosti iz hitrosti zvoka	121
6.6 Izračun napak pri meritvah stisljivosti	122
6.7 Izračun modula stisljivosti ionske tekočine EMIM-EtSO ₄ ter pripadajočih pogreškov za eno merilno točko	124
6.8 Rezultati meritev stisljivosti.....	125
6.8.1 Ugotovitve pri merjenju stisljivosti tekočin	128
6.8.2 Ugotovitve pri merjenju stisljivosti tekočine EMIM-EtSO ₄	129

7 SKLEP..... 131

7.1 Smernice in omejitve pri rabi ionskih tekočin v hidravličnih sistemih	132
---	-----

7.2 Možna področja uporabe v hidravličnih in mazalnih sistemih 133

SEZNAM UPORABLJENIH VIROV 135

KAZALO SLIK 143

KAZALO PREGLEDNIC 147

RAZISKAVA PRIMERNOSTI IONSKIH TEKOČIN ZA UPORABO V HIDRAVLIČNIH SISTEMIH

Ključne besede: ionske tekočine, fluidna tehnika, mazivo, hidravlična tekočina

UDK klasifikacija: 661.177:621.22(043.3)

POVZETEK

Vsaka vrsta hidravlične tekočine ima svoje prednosti za določen primer uporabe. Voda, kot prva in tudi v zadnjih letih ponovno aktualna hidravlična tekočina je negorljiva, praktično nestisljiva, neškodljiva za zdravje človeka ter okolje, cenena in razpoložljiva skoraj povsod. Mineralno olje je možno uporabiti skoraj povsod in v raznovrstni opremi. Težko vnetljive hidravlične tekočine zaradi večje varnosti pred požarom uporabljamо predvsem v metalurških obratih in premogovnikih, biološko hitreje razgradljive hidravlične tekočine pa zaradi manjše nevarnosti za okolje predvsem v mobilni hidravliki. Poleg prednosti pa ima vsaka vrsta hidravlične tekočine tudi slabosti, tako da je pri izbiri najbolj primerne vedno potreben nek kompromis. Idealne rešitve ni, radi pa bi se ji vsaj približali.

Cilj doktorske disertacije je bil, da v praktično neomejenem številu različnih ionskih tekočin, skušamo poiskati nekaj primernih za uporabo v hidravličnih sistemih in na ta način predlagati bodočo alternativo današnjim, običajno uporabljanim hidravličnim tekočinam. V ta namen so obravnavane osnovne lastnosti ionskih tekočin in njihove prednosti. Primernost smo ugotavljali tako na osnovi meritev fizikalno kemijskih lastnosti, kot tudi na osnovi praktičnih testov, aktualnih za hidravlične tekočine. V disertaciji so uporabljene laboratorijske in praktične testne metode tudi podrobnejše opisane.

Veliko pozornosti je posvečeno sposobnosti korozijske zaščite, saj večina testiranih vzorcev ni nudila zadostne zaščite pred korozijo. Prav tako je podrobnejše obravnavana stisljivost, saj ima neposreden vpliv na porabo energije in odzivnost hidravličnih sistemov.

Pri iskanju ionske tekočine, ki bi bila primerna za uporabo v hidravličnih sistemih se je izkazalo, da kljub nekaterim boljšim rezultatom v primerjavi s konvencionalnimi hidravličnimi tekočinami, (za sedaj) ni veliko takih, ki bi vse potrebne lastnosti imele vsaj na trenutnem nivoju konvencionalnih hidravličnih tekočin.

X

RESEARCH REGARDING THE USABILITIES OF IONIC LIQUIDS WITHIN HYDRAULIC SYSTEMS

Key words: ionic liquids, fluid power, lubricant, hydraulic fluid

UDK: 661.177:621.22(043.3)

ABSTRACT

Each type of hydraulic fluid has its advantages in regard to its specific use. Water, as the first and over past years also a promising hydraulic fluid, is non-flammable, virtually incompressible, harmless to human health and the environment, inexpensive, and available almost everywhere. Mineral oil can be used almost anywhere and in miscellaneous equipment. Fire-resistant hydraulic fluids are mainly used in metallurgical plants and coal mines because of greater fire safety, whereas bio-degradable hydraulic fluids are commonly used in mobile hydraulics due to environmental protection. However, besides its advantages, each type of hydraulic fluid also has its disadvantages. Therefore, selecting the more appropriate always requires compromise. There are no ideal solutions, but we would like to attain them as closely as possible.

The aim of this doctoral thesis was to discover, from amongst a virtually unlimited number of different ionic liquids, an ionic liquid suitable for use in hydraulic equipment and to suggest a future alternative to today's commonly used hydraulic fluids. The basic properties of ionic liquids and their benefits are considered for that reason. Their suitability were determined based on measurements of physical and chemical properties as well as on practical test for hydraulic fluids. Laboratory and practical test methods are also described in detail.

Great attention was paid to corrosion protection performance, as most of the samples tested offered insufficient protection against corrosion. Compressibility is also discussed in detail, considering it has a direct impact on energy consumption and the response of the hydraulic system.

Research regarding the usability of ionic liquids within hydraulic systems revealed, that despite some better results for ionic liquids, few of them had all the necessary features of conventional hydraulic fluids required by today's hydraulic systems.

UPORABLJENI SIMBOLI

Simbol	Enota	Pomen
A	[mm ²]	- presek bata/cevi
A_b	[m ²]	- površina bata
A_{DEF}	[mm ²]	- presek deformirane cevi
c	[m/s]	- hitrost zvoka
c	[m/s]	- hitrost stoječega valovanja
C	[°C]	- plamenišče
C_H	[m ³ Pa ⁻¹]	- hidravlična kapacitivnost
c_i	[m/s]	- hitrost zvoka i-te meritve
c_{olje}	[N/m]	- vzmetna konstanta hidravlične tekočine
d_n	[mm]	- notranji premer cevi
d_{nDEF}	[mm/bar]	- deformacija premera na enoto tlaka
E	[N/m ²]	- modul elastičnosti
E_{st}	[bar]	- modul elastičnosti cevi
F_I	[%]	- sposobnost filtracije v stopnji I
F_{II}	[%]	- sposobnost filtracije v stopnji II
k	[mm]	- korak navoja
K	[Pa]	- modul stisljivosti
K	[mm Hg]	- atmosferski tlak
K	[kg]	- konstanta viskozimetra
K'_{olje}	[Pa]	- nadomestni modul stisljivosti olja
l	[mm]	- dolžina cevi, razdalja med koncema cevi
l	[m]	- položaj bata v valju
l_0	[mm]	- začetna razdalja med batoma pri tlaku 0 bar
l_c	[m]	- dolžina vseh cevi v merilni napravi
l_i	[mm]	- razdalja med batoma pri i-ti meritvi
L	[m]	- razdalja med piezoelektričnima senzorjema
m	[g]	- masa nalite tekočine
m	[g]	- masa bremena vključno z maso bata in batnice

m_a	[g]	- masa tekočine in vseh uporabljenih posod po nalivanju
m_b	[g]	- masa tekočine in vseh uporabljenih posod pred nalivanjem
n_i	[/]	- število vrtljajev pri i-ti meritvi
p	[bar]	- tlak v cevi
P	[kPa]	- atmosferski tlak
p_i	[bar]	- tlak v cevi pri i-ti meritvi
p_{i-1}	[bar]	- tlak v cevi pri i-1. meritvi
t	[mm]	- debelina stene cevi
t	[s]	- poprečna vrednost meritve časa
t_{krit}	[s]	- čas širjenja udarnega vala
T_{10}	[s]	- izmerjen čas filtracije 10 ml olja
T_{50}	[s]	- izmerjen čas filtracije 50 ml olja
T_{200}	[s]	- izmerjen čas filtracije 200 ml olja
T_{300}	[s]	- izmerjen čas filtracije 300 ml olja
T_V	[s]	- izračunan čas filtracije olja
U_{drs}	[m/s]	- hitrost drsenja kroglice in diska
U_{kr}	[m/s]	- hitrost kroglice
U_{pl}	[m/s]	- hitrost ploščice
U_{sr}	[m/s]	- srednja hitrost drsenja kroglice in diska
V	[ml]	- volumen nalite tekočine
V	[ml]	- filtrirani volumen v času T_v
V_0	[ml]	- začetni volumen tekočine
V_b	[ml]	- volumen, zaradi premika bata
V_i	[ml]	- volumen i-te meritve
V_{i-1}	[ml]	- volumen i-1. meritve
V_{raz}	[mm ³]	- volumen raztezka merilne naprave
γ_{sl}	[mN/m]	- mejna površinska napetost med tekočino in trdnim telesom
δ_i	[%]	- relativna napaka spremenljivke i
ΔF	[N]	- sprememba sile
Δl	[m]	- pot, ki jo prepotuje zvok
Δl	[m]	- pomik valja zaradi stisljivosti ob spremembji sile
Δp	[Pa]	- sprememba tlaka

Δp_i	[bar]	- sprememba tlaka i-te meritve
Δt	[s]	- čas, ki ga porabi zvok, da prepotuje pot Δl
Δt_i	[s]	- čas, ki ga porabi zvok, da prepotuje pot L pri i-ti meritvi
ΔV	[ml]	- sprememba volumna
ΔV_{cel}	[ml]	- celotna sprememba volumna zaradi elastičnosti sestavin
ΔV_{olje}	[ml]	- sprememba volumna olja
ΔV_{cev}	[ml]	- sprememba volumna tekočine v priključnih ceveh
ΔV_{zrak}	[ml]	- sprememba volumna zaradi prisotnih zračnih mehurčkov
Δv	[m/s]	- sprememba hitrosti
λ	[m]	- valovna dolžina stoječega valovanja
θ	[°]	- kontaktni kot
ν	[Hz]	- frekvenca stoječega valovanja
ν	[mm ² /s]	- kinematična viskoznost
ν_i	[Hz]	- frekvenca stoječega valovanja i-te meritve
ρ	[kg/m ³]	- gostota tekočine
$\rho(p_i)$	[kg/m ³]	- gostota tekočine pri tlaku i-te meritve
σ_l	[mN/m]	- površinska napetost tekočine
σ_s	[mJ/m ²]	- prosta površinska energija trdnega telesa
x	[mm]	- pot bata
χ	[Pa ⁻¹]	- stisljivost
χ_i	[Pa ⁻¹]	- stisljivost i-te meritve
$\bar{\chi}_i$	[Pa ⁻¹]	- povprečna stisljivost vseh meritev
$\chi_{i,dV}$	[Pa ⁻¹]	- stisljivost izračunana iz spremembe tlaka in prostornine
$\chi_{i,z}$	[Pa ⁻¹]	- stisljivost izračunana iz spremembe položaja v času
$\chi_{i,v}$	[Pa ⁻¹]	- stisljivost izračunana iz frekvence stoječega valovanja
$\omega_{0,bat}$	[s ⁻¹]	- lastna frekvenca hidravličnega valja

UPORABLJENE KRATICE

AFNOR	- francoska organizacija za standardizacijo
ASTM	- ameriška organizacija za standardizacijo
AW	- proti obrabni (Anti-Wear)
BF4	- tetrafluoro borat
BMIM-BF4	- 1-butil-3-metil imidazolij tetrafluoro borat
[C ₂ mim][PF ₆]	- 1-etil-3-metil imidazolij heksafluoro fosfat
[C ₄ mim][BF ₄]	- 1-butil-3-metil imidazolij tetrafluoro borat
[C ₄ mim]Cl	- 1-butil-3-metil imidazolij klorid
[C ₄ mim][NTf ₂]	- 1-butil-3-metil imidazolij bis[(trifluorometil)sulfonil]imid
[C ₄ mim][PF ₆]	- 1-butil-3-metil imidazolij heksafluoro fosfat
CETOP	- evropsko združenje za fluidno tehniko
DBDS	- dibenzil disulfid
DIN	- nemški industrijski standard (Deutsche Industrie Norm)
DSA	- analiza oblike kapljice (Drop Shape Analysis)
DSC	- diferenčna dinamična kalorimetrija
EG	- etilenglikol
EMIM EtSO ₄	- 1-etil-3-metil imidazolij etilsulfat
EMIM-MeSO ₃	- 1-etil-3-metil imidazolij metansulfonat
EMIM-SCN	- 1-etil-3-metil imidazolij tiocianat
EMIM-TFSI	- 1-etil-3-metil imidazolij bis(trifluorometansulfonil)imid
EP	- visoki tlaki (Extreme Pressure)
FFT	- hitra Fourierova transformacija
FTIR	- infrardeča Fourierova transformacija
HFA	- težko vnetljiva hidravlična tekočina (olje v vodi)
HFB	- težko vnetljiva hidravlična tekočina (voda v olju)
HFC	- težko vnetljiva hidravlična tekočina (voda-glikol)
HFD	- težko vnetljiva hidravlična tekočina (povsem sintetična)
HFDU	- težko vnetljiva hidravlična tekočina (sintetični ester)
HM	- mineralno hidravlično olje po ISO 6743-4: 1999
HV	- HM po ISO 6743-4: 1999 z višjim indeksom viskoznosti
IEC	- mednarodna elektrotehniška komisija

IL-17PI045	- ionska tekočina-kvaterni amonijev fosfat
NBR,	- nitrilna guma (Nitrile Butadiene Rubber)
NTf2	- bis[(trifluorometil)sulfonil]imid
PAO	- polialfaolefin
PF ₆	- heksafluoro fosfat
PFPE	- perfluoropolieter
TCP	- tri krezil fosfat
TFSI	- bis(trifluorometansulfonil)imid
TOMA DBP	- 3-oktil-metil-amonij dibutil-fosfat
TOMA DBP+40 % NMP	- 3-oktil-metil-amonij dibutil-fosfat s 40 % N-metil-2-pirolidona
TOMA HFB	- 3-oktil-metil-amonij dibutil-fosfat heksafluorobenzen
TOMA palm	- 3-oktil-metil-amonij dibutil-fosfat palmitat

POJASNILO

Skladno s sporazumom o zaupnosti, podpisanim dne 02.02.2011 v okviru projekta H.O.P.E. (Hawe-Olma-Proionic-Engineering), nekaterih informacij, ki veljajo kot poslovna skrivnost, v času trajanja projekta in v časovnem obdobju 5 let po zaključku projekta, ne smemo objaviti.

V zvezi z zgornjim odstavkom smo zato pri nekaterih vzorcih ionskih tekočin navedli samo oznake vzorca, ne pa bolj podrobnih oznak iz katerih bi bila razvidna sestava ionske tekočine. To velja tudi za ionsko tekočino, označeno kot IL-17PI045, ki se v tekstu doktorske naloge pogosto pojavlja.

1 UVOD

1.1 Opis splošnega področja dela - razvoj hidravličnih tekočin

Hidravlične tekočine¹ danes uporabljamo praktično v vseh vejah industrije in predstavljajo velik delež v skupni porabi maziv. Že od začetka uporabe hidravličnih tekočin človek stremi k izboljšanju njihovih lastnosti. Zaradi tega je v dobrih dveh stoletjih njihove uporabe število različnih tekočin, ki jih dandanes uporabljamo v hidravličnih napravah, precej naraslo. Vsaka od njih ima prednosti na določenem področju uporabe. Voda je na primer negorljiva in neškodljiva za okolje in človeka, mineralno olje najbolj univerzalno uporabno, biološko hitreje razgradljiva olja tudi manj ogrožajo okolje, hidravlična olja za uporabo v prehrambni industriji lahko pridejo v stik z živili in podobno.

Dandanes kar okoli 90 % porabe vseh hidravličnih tekočin predstavljajo mineralna olja različnih lastnosti, preostanek pa predvsem težko vnetljive ter biološko hitreje razgradljive hidravlične tekočine. V zelo nizkem deležu pa uporabljamo tudi univerzalne tekočine za predležje, motor in hidravlični del. Poleg tega uporabljamo tudi tekočine za posebne namene, v prehrambni industriji na primer združljive z živili, drugod morsko vodo, kot tudi t.i. elektro reološke tekočine, ki dejansko so in niso tekočine, saj lahko spreminja svoje agregatno stanje. Nobena tekočina pa ni tako univerzalna, da bi lahko izpolnila včasih zelo različne ali celo protislovne zahteve na posameznih področjih uporabe. Razvojni inženirji zato še vedno vlagamo ogromno naporov, časa in sredstev v iskanje hidravlične tekočine, ki bi bila blizu idealni hidravlični tekočini. Med drugim bi tako morala biti negorljiva, nestrupena, nekorozivna, imeti odlične mazalne lastnosti, temperaturno neodvisne fizikalno kemijske lastnosti, obstojna – zagotavljati dolgo uporabno dobo, itd.

1.2 Opredelitev doktorske disertacije in teze

Ena od osnovnih nalog proizvajalcev maziv je iskanje alternativ obstoječim mazivom in spremeljanje odkritij na sorodnih področjih. S tem odpiramo nove tržne niše in si dvigujemo

¹ Tekočina je skupno ime za podmnožico faz snovi, ki zajema kapljevine in pline. Zato bi bil bolj primeren izraz hidravlične kapljevine. Ker pa se v tehniški praksi veliko pogosteje uporablja izraz hidravlične tekočine, bo ta uporabljan tudi v nadaljevanju.

konkurenčnost na trgu. To pa je v prihodnosti lahko ključnega pomena za preživetje podjetja, saj se v razvitem svetu (Severna Amerika, zahodna Evropa) poraba maziv zmanjšuje, zmanjšuje se število proizvajalcev maziv, razmere na trgu maziv pa se zaostrujejo. Zato kljub številnim vrstam hidravličnih in drugih tekočin, omenjenih v točki 1.1, še vedno iščemo približek idealni tekočini.

Danes težko z gotovostjo trdimo, katere tekočine bodo v prihodnosti, v prihajajočem »post naftnem času« imele pomembno vlogo. To je odvisno od rezultatov sedanjih in prihodnjih raziskav ter testiranj, od smeri razvoja fluidne tehnike, od gibanja cen surovin na svetovnih trgih ter še od marsičesa. Z veliko večjo verjetnostjo lahko rečemo, da tudi v bližnji prihodnosti še ne bomo uporabljali univerzalne tekočine, ki bi bila tako superiorna in blizu idealni, da bi izpodrinila vse ostale.

Ionske tekočine se zaradi svojih dobrih lastnosti, s katerimi so se že izkazale na nekaterih področjih industrije, danes ponujajo kot eden najresnejših kandidatov. Zato smo si zadali nalogu, da preverimo ali so pričakovanja upravičena. To smo naredili z raziskavami fizikalno kemijskih lastnosti nekaterih namensko izbranih ionskih tekočin v laboratorijih podjetij Olma d.d. v Ljubljani, Fakultete za strojništvo v Mariboru, Fakultete za strojništvo v Ljubljani, Proionic GmbH v Grazu (Avstrija), TU Graz-Institut für Fertigungstechnik (Avstrija), SIJ-Acroni d.o.o. in Quaker Chemical B.V., Uithoorn (Nizozemska).

Za namene raziskav smo uporabili večinoma standardno laboratorijsko opremo, s katero smo opravili tudi večino meritev fizikalno kemijskih lastnosti ionskih tekočin in izvedli primerjavo z ostalimi vrstami hidravličnih tekočin. Ta oprema med drugim zajema viskozimetre, merilnik gostote, pH meter, vlažno komoro, opremo za določanje lastnosti penjenja, opremo za določanje deemulzivnih lastnosti, IR spektrometer, titrator KF, štirikrogelni aparat za določanje mazalnih lastnosti, XRF spektrometer, ICP-OES instrument itd. Ker je pri hidravličnih tekočinah zelo pomemben podatek tudi njihova stisljivost in odvisnost od tlaka, so bile v raziskave vključene tudi meritve stisljivosti, hitrosti širjenja zvoka oz. tlačnega vala, velikosti tlačnega udara, torej veličine, ki neposredno vplivajo na delovanje, oziroma dinamiko hidravličnega sistema, še posebej, ko gre za regulirane pogone. Navedene metode preizkušanja so bile razvite večinoma za maziva na mineralni osnovi, saj le-ta dandanes predstavljam okoli 90 % skupne porabe maziv.

Na osnovi trenutnega poznavanja stanja obravnavanega strokovnega področja in zadanih namenov raziskav lahko postavimo naslednje glavne teze doktorske naloge:

- 1) *Dokazati, da je možno izmed široke palete ionskih tekočin (trenutno 10^{18} variacij kationov in anionov) izluščiti tisto (oz. tiste kombinacije), ki bo (oz. bodo) trenutno*

najprimernejša/e za uporabo v sodobnih hidravličnih sistemih in zaradi svojih lastnosti ne bo/bodo imela/e za posledico prevelikih konstrukcijskih sprememb ali prilagoditev hidravličnih sestavin.

- 2) *Poiskati nove kandidate in usmeritve sinteze ionskih tekočin, ki bi bili zmožni s svojimi fizikalno kemijskimi lastnostmi ne samo nadomestiti sedanje hidravlične tekočine na mineralni ali sintetični osnovi, temveč bi imeli določene primarne lastnosti veliko boljše od njih.*
- 3) *Dokazati, da je za ovrednotenje in testiranje ionskih tekočin primernih za uporabo kot hidravlične tekočine, možno uporabiti standardizirane postopke, ki se primarno uporablja za mineralna olja. Razen tega pa podati oceno oz. predlog za dopolnitev oz. modifikacijo določenega standarda oz. njegovo neupoštevanje.*

Poleg omenjenih glavnih ciljev doktorske naloge navedenih v tezah, pa smo hkrati z raziskavami in cilji naloge že leli poiskati odgovore tudi na sledeča vprašanja:

- Preveriti uporabnost ionske tekočine tudi kot rezalne in hladilne tekočine, primerne za uporabo na obdelovalnih strojih.
- Poiskati odgovore glede združljivosti določenih ionskih tekočin z materiali, kakršni se uporablja v hidravličnih sistemih in podati omejitve glede uporabe.

1.3 Struktura doktorske disertacije

Najprej so obravnavane različne vrste danes uporabljenih hidravličnih tekočin. Naštete so naloge, ki jih morajo izpolnjevati za uporabo v sodobni hidravlični opremi. Na kratko so opisani razvoj in razlogi, ki so priveli do uporabe posameznih tekočin za različne namene. Navedene so osnovne lastnosti, ki jih mora imeti hidravlična tekočina za uporabo v sodobnih hidravličnih sistemih.

V sklopu raziskave primernosti ionskih tekočin za uporabo v hidravličnih sistemih so najprej navedene osnovne lastnosti ionskih tekočin in njihove prednosti. Nato je prikazano trenutno stanje njihove uporabe v industriji. Navedene so raziskave, ki so bile opravljene na področju uporabe ionskih tekočin kot maziv. Teh je bilo opravljenih že veliko, praktično nič pa glede možnosti njihove uporabe v hidravličnih sistemih, kar je bil tudi razlog, da smo izbrali prav to temo kot temelj našega raziskovalnega dela.

Ocena primernosti ionskih tekočin za uporabo v hidravličnih sistemih je bila opravljena na osnovi številnih laboratorijskih preizkusov različnih vzorcev ionskih tekočin. Zato so v nadaljevanju podrobneje opisane standardne meritve fizikalno kemijskih lastnosti, ki smo jih

uporabili v raziskavi. Poleg običajnih standardnih metod smo uporabili tudi nekatere specialne metode, nekatere prav tako standardne za preizkušanje lastnosti maziv, druge pa prilagojene namenu naše raziskave. Velikokrat smo opravili primerjalne meritve lastnosti ionskih tekočin in mineralnega hidravličnega olja, zato so podani tudi rezultati te primerjave.

Ker smo že pri prvih vzorcih ionskih tekočin ugotovili slabo sposobnost korozijske zaščite, je bila temu v nadaljevanju posvečena še posebna pozornost. Primerljiva sposobnost zaščite pred korozijo, kot jo nudi mineralno hidravlično olje, je postal zato eden glavnih kriterijev za primernost uporabe ionskih tekočin v hidravličnih sistemih. Nismo namreč želeli pogojevati uporabe ionske tekočine z menjavo danes običajnih hidravličnih sestavin s takšnimi, kjer bi lahko uporabljali tudi kemijsko agresivne ionske tekočine. Za določanje sposobnosti zaščite pred korozijo smo uporabili različne metode, kot je korozijski test v vlažni komori, korozivnost na baker in test korozije na zraku. Še zlasti pomemben pa je sicer nestandardni, toda verjetno še najbolj merodajen test združljivosti ionskih tekočin s sestavnimi deli hidravličnih sistemov, ki je omogočil zaključke glede uporabnosti ionskih tekočin v hidravličnih sistemih in omejitve pri tem.

Stisljivost je prav tako ena od zelo pomembnih lastnosti hidravličnih tekočin, neposredno povezana s porabo energije in odzivnostjo hidravličnega sistema, zato je bila tudi njej posvečena velika pozornost. Navedeni so načini merjenja stisljivosti, za praktično določitev stisljivosti ionskih tekočin, mineralnega hidravličnega olja in težko vnetljive hidravlične tekočine pa smo uporabili namensko zgrajen sistem.

V zaključku disertacije so navedene smernice in omejitve pri rabi ionskih tekočin v hidravličnih sistemih, nakazana pa so tudi možna področja uporabe ionskih tekočin v mazalnih sistemih.

2 VRSTE IN LASTNOSTI HIDRAVLIČNIH TEKOČIN

2.1 Idealna hidravlična tekočina

Hidravlična tekočina je pomembna sestavina hidravličnega sistema. Prenos hidravlične moči od črpalke do porabnikov je primarna naloga hidravlične tekočine. Druga pomembna naloga, ki jo mora opravljati hidravlična tekočina je ta, da deluje kot mazalno sredstvo in s tem zmanjšuje obrabo gibajočih se delov, npr. na ležajnih mestih, črpalkah in motorjih [1], [2], [3]. Pravilna izbira hidravlične tekočine zagotavlja tudi zanesljivo delovanje hidravličnih krmilij in pogonov ter odločilno vpliva na njihov izkoristek. Zadosten razlog, da se pobliže predstavijo naloge, ki jih mora opravljati oz. zahteve, katere mora izpolnjevati hidravlična tekočina.

2.1.1 Naloge hidravlične tekočine

Naloge hidravlične tekočine in iz njih izhajajoče zahteve, ki jih mora izpolnjevati, sta dva med seboj tesno, oz. drug z drugim povezana pojma. Iz naloge, ki jo mora tekočina opravljati oz. iz specifičnosti naloge izhajajo zahteve, ki jih mora hidravlična tekočina izpolnjevati. V osnovi mora tekočina opravljati svojo fizikalno nalogu, pri čemer morajo biti upoštevane ekonomske in ekološke zahteve. Primarna fizikalna naloga je:

- prenos sil in gibanj.

Prenos hidravlične moči od črpalke do porabnikov je primarna naloga hidravlične tekočine. Poleg izpolnjevanja te fizikalne naloge, ki jo dokaj dobro opravljajo vse hidravlične tekočine, se pojavlja še cela vrsta drugih nalog.

Druga pomembna naloga, ki jo mora opravljati hidravlična tekočina je ta, da deluje kot mazalno sredstvo in s tem zmanjšuje obrabo gibajočih se delov, npr. na ležajnih mestih. Poleg tega naj bi bile tudi sestavine hidravličnega sistema zaščitene pred korozijo in ostalimi kemičnimi spremembami. Vse izgube, nastale pri trenju in dušenju toka tekočine, se morajo v obliki toplotne energije odvajati dalje.

Vse ostale naloge lahko zajamemo v skupini ekonomskih in ekoloških zahtev, ki so naslednje:

- dolga uporabna doba vseh sestavin,

- gospodarnost,
- varnost,
- majhna obremenitev okolja,
- neškodljiva/nestrupena za ljudi in okolje.

Omenjene naloge oz. zahteve in lastnosti tekočine naj bi se opravljale oz. naj bi bile zagotovljene v širokem področju obratovalnih temperatur in tlakov. S kontaminacijo, npr. obrabnimi delci ali vodo, se lastnosti same tekočine ne bi smele spremenjati. Nenazadnje naj bi tekočina tako iz ekonomskih kot ekoloških vzrokov dosegla dolgo uporabno dobo, ne da bi pri tem spremenila svoje lastnosti.

Ena od zahtev, ki izhaja iz varnostnih razlogov in, ki jo mora pogosto izpolnjevati hidravlična tekočina, je njena nevnetljivost oz. vnetljivost šele pri visokih temperaturah. Nadalje naj bi zaradi zahtev varstva pri delu imela hidravlična tekočina tudi majhno nagnjenost k izhlapevanju.

Že vrsto let pridobiva na pomenu tudi ekološki vidik. Še posebej na področju mobilnih naprav je zaželena uporaba hidravličnih tekočin, ki v nasprotju z običajnimi hidravličnimi tekočinami ne obremenjujejo okolja, saj se takšna tekočina npr. v primeru zunanjega puščanja hitro in v celoti razgradi, s toksikološkega vidika pa ima uporaba takšne tekočine manj pomislekov.

Vse te zahteve pa žal ne podpirajo druga druge in se jih zato tudi ne da izpolniti v polnem obsegu. Zaradi tega si morata biti snovalec in uporabnik hidravlične naprave toliko bolj na jasnem o področju uporabe naprave, njenih pogojev uporabe in tehničnih zahtevah. Šele potem se lahko utemeljeno oz. premišljeno postavijo zahteve, katere bi morala izpolnjevati hidravlična tekočina, ter se uskladijo z njihovimi fizikalnimi lastnostmi.

2.1.2 Osnovne vrste hidravličnih tekočin in zahteve

Hidravlična tekočina, ki so jo uporabljali v prvih hidravličnih oz. hidrostatičnih napravah je bila voda, ki je tej tehniki oz. napravam tudi podelila ime (grško: hydor=voda). Vsekakor je voda (brez vseh dodatkov) najenostavnejši in najcenejši medij, ki ga uporabljamamo v hidravliki, vendar ima veliko pomanjkljivosti. Njeno uporabo omejujejo naslednja dejstva:

- Voda povzroča oksidacijo in korozijo kovinskih površin.
- Voda ima nizko viskoznost in zaradi tega otežuje tesnjenje.
- Gibajoči deli v črpalkah, hidravličnih motorjih in ventilih se pomanjkljivo mažejo in tako predčasno obrabijo.

Vodo kot hidravlično tekočino uporabljamo pri hidravličnih napravah, kjer so zahtevane velike količine tekočine, npr. pri stiskalnicah, vendar ne samo čisto vodo, temveč z dodatki, npr. glicerina ali proti korozijskih dodatkov, ki preprečujejo oksidacijo in korozijo. Pomembni deli naprav so tudi izdelani iz korozionsko obstojnih kovinskih ali nekovinskih materialov (npr. keramika).

Čeprav je voda cenejša od olja in ima tudi nekatere druge odlike (npr., da njena viskoznost ni odvisna od temperature, je negorljiva, manj stisljiva, ekološko sprejemljiva ...) v glavnem kot hidravlične tekočine uporabljamo mineralna olja, ker:

- ni nevarnosti, da se pojavi korozija oz. je ta nevarnost zelo majhna,
- so istočasno tudi mazalno sredstvo,
- imajo mnogo višjo viskoznost, zaradi česar je izvedba tesnjena cenejša.

Olja kot hidravlične tekočine pa imajo zaradi velike viskoznosti (v primerjavi z vodo) določene slabosti:

- večja je temperaturna odvisnost,
- toplotna prevodnost je nizka,
- potrebni so večji preseki cevovodov.

V hidravličnih napravah v glavnem uporabljamo dve večji skupini hidravličnih tekočin:

- mineralna olja, predvsem olja na bazi parafinov in rafinirana olja, ki jih v glavnem uporabljamo za običajne pogoje obratovanja,
- težko vnetljive hidravlične tekočine, za posebne obratovalne pogoje kakršni so npr. v valjarnah, livarnah, jeklarnah, rudnikih, premogovnikih, hidravličnih napravah na pečeh in tudi v letalski industriji.

Dandanes hidravlične sisteme uporabljamo na različnih področjih in za različne naloge. Zato mora biti hidravlična tekočina že v osnovi sposobna opravljati vse že naštete osnovne naloge: prenašati sile, mazati gibajoče dele, odvajati nastalo toplovo zaradi izgub v okolico, poleg tega pa mora dušiti tudi hrup in nihanja, ki jih povzročajo tlačni udari, prenašati signale ..., ob najrazličnejših obratovalnih pogojih npr. različnih tlakih, hitrostih tekočine ali temperaturah.

Zahtev, ki jih mora izpolnjevati hidravlična tekočina, je vsekakor zelo veliko. Hidravlična tekočina mora tako:

- imeti dober mazalni učinek, da je obraba gibajočih se delov čim manjša. To lastnost mora imeti pri vseh spremembah tlaka oz. temperature,

- imeti veliko trdnost mazalnega filma, da se ta ne pretrga in da ne nastane povečano trenje in s tem obraba,
- imeti primerno kemično obstojnost in stabilnost. Te lastnosti mora obdržati pri vseh spremembah tlaka in temperature. Ob prisotnosti kisika iz zraka se ne sme zgostiti ali onesnažiti,
- imeti viskoznost, čim manj odvisno od temperature, kar pomeni, da je njena karakteristika (viskoznost - temperatura) čim bolj položna. Pri povišanju temperature se viskoznost ne sme preveč znižati, saj bi se tako pojavljali različni učinki dušenja na dušilkah ali ventilih in s tem motnje v delovanju naprave. Tudi izgube zaradi višjega notranjega puščanja pri višji temperaturi bi imele večji motilni učinek,
- imeti ugodno viskoznost v področju obratovalnih temperatur: običajno $20 \div 30 \text{ mm}^2/\text{s}$ pri 50°C . Previsoka viskoznost povzroča večje notranje trenje v tekočini in s tem pri pretakanju tekočine večje tlačne izgube in slabši izkoristek sistema. Pri vseh temperturnih spremembah lahko viskoznost le malo odstopa od svojega optimuma,
- imeti veliko specifično toploto (velika termična obremenljivost). Za kratek čas sme tekočina priti v stik z deli, ki imajo višjo temperaturo, tudi višjo od 100°C (normalne delovne temperature tekočine pa znašajo do 60°C),
- varovati občutljive dele pred korozijo,
- po možnosti biti odporna proti staranju,
- imeti čim višjo temperaturo plamenišča (in točko gorenja),
- imeti čim nižjo točko tečenja. To je pomembno predvsem za hidravlične naprave, ki obratujejo v hladnem okolju. V letalstvu zaradi tega uporabljajo posebne tekočine s točko tečenja do -60°C , običajno mešanice mineralnih olj in glicerinov, oz. mešanice z belim-špiritem ali kerozinom.

Poleg tega pa hidravlična tekočina ne sme:

- imeti prevelike površinske napetosti, saj lahko prihaja do penjenja tekočine in s tem do pojava kavitacije in posledično do izgube moči ali do poškodb predvsem črpalk in odpovedi le teh,
- tvoriti emulzije z velikimi količinami vode, sicer se njena viskoznost spremeni (velja za čista mineralna olja). Voda, ki prispe v tekočino, npr. v mineralno olje, se mora hitro in enostavno izločiti,
- pri obratovalnih temperaturah tvoriti škodljivih par,

- vsebovati prevelike količine trdnih delcev, saj lahko pride do zamašitve ozkih rež oz. dušilnih mest,
- oksidirati ob segrevanju, niti izgubiti svojih mehanskih lastnosti,
- absorbirati zraka ali ga vsebovati, sicer lahko pride do penjenja. Pene naj bi se težko tvorile in hitro izginile. Zrak povzroča tudi hitrejšo oksidacijo olja. Olje absorbira tem manj zraka, čim manjša je njegova kontaktna površina z zrakom. Da je absorpcija zraka čim manjša, morajo biti priključki sesalnih vodov (podtlak) zanesljivo zatesnjeni, konci cevovodov v rezervoarju speljani pod gladino tekočine, cevovodi pa položeni tako, da se v njih ne morejo tvoriti zračni žepki,
- imeti škodljivega učinka na zdravje uporabnikov.

Takšna hidravlična tekočina, ki bi istočasno imela vse naštete dobre lastnosti, žal ne obstaja. Najugodnejši kompromis med vsemi zahtevami predstavljajo mineralna olja, ki jih zato tudi najpogosteje uporabljam. Ob dodajanju določenih dodatkov - aditivov, pa lahko olja priredimo posebnim namenom uporabe.

Tako obstajajo dodatki za:

- izboljšanje obnašanja viskoznost-temperatura (izboljševalci indeksa viskoznosti),
- povečanje tlačne trdnosti (EP - extreme pressure dodatki),
- znižanje strdišča,
- preprečevanje obrabe (AW – antiwear dodatki),
- izboljšanje korozjske zaščite,
- povečanje obstojnosti proti staranju (antioksidanti),
- preprečevanje penjenja (anti-foam additives-protipenilci),
- ...

Obstajajo tudi številni drugi dodatki, ki pa so uporabniku škodljivi. Njihove negativne lastnosti se pokažejo šele po daljšem času.

Pri hidravličnih tekočinah zato pogosto govorimo o osnovni ali bazni tekočini, ki jo šele ob dodajanju določenih snovi, t. i. dodatkov oz. aditivov pripravimo do sestave z želenimi lastnostmi. Delež dodatkov je lahko zelo različen glede na vrsto hidravlične tekočine. Vrsta osnovne tekočine, ki je prav tako lahko mešanica različnih molekul enake vrste, načelno določa vrsto tekočine (in s tem njeno oznako) ter področje uporabe tekočine.

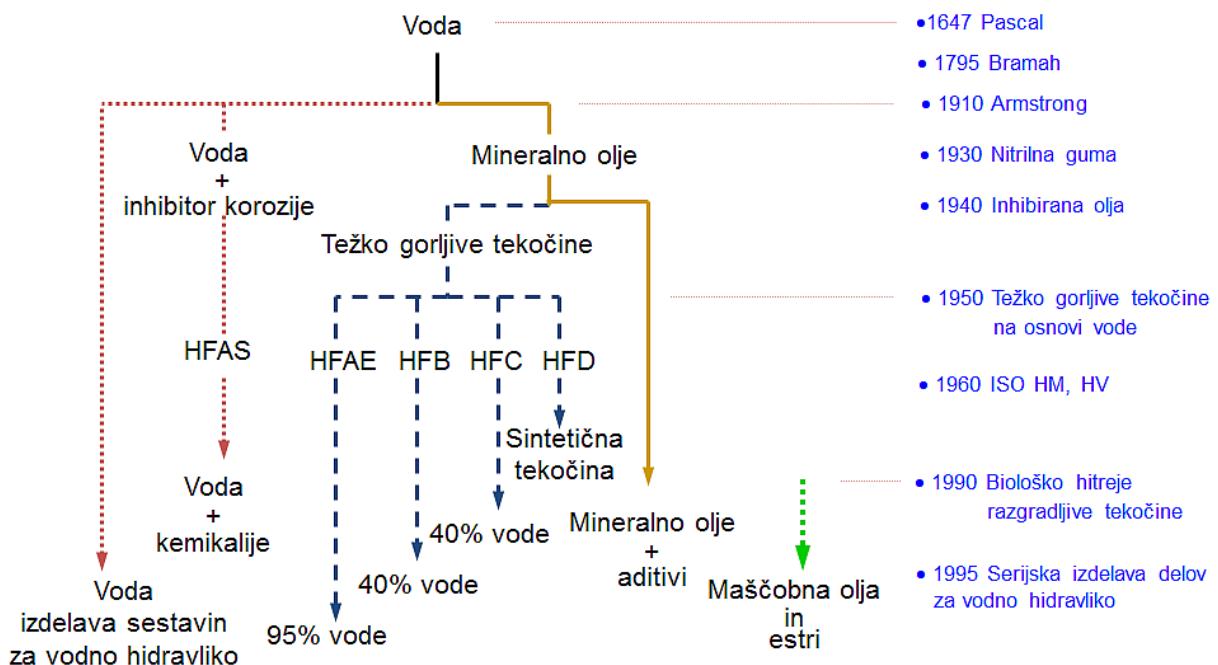
2.2 Kratek opis razvoja hidravličnih tekočin

Že od začetka uporabe hidravličnih tekočin človek stremi k izboljšanju njihovih lastnosti. Uporaba hidravličnih tekočin se je praktično pričela hkrati z zgodnjimi začetki snovanja hidravličnih naprav. Prvi zabeležen poskus sega v sredino 17. stoletja, ko je francoski fizik Blaise Pascal na osnovi opazovanj nizozemskega mojstra za izdelovanje zapornic, Stevina; zapisal vsem dobro znano enačbo $p=F/A$. Enačba poimenovana po njem, znana kot Pascalov zakon, predstavlja temelj današnje hidravlike oz. pravilne hidrostatike, na katere principih delujejo vse hidravlične sestavine. Na osnovi zakona je tudi praktično dokazal, da lahko z majhnim curkom tekočine dvigujemo velika bremena - princip transformacije sile in transformacije tlaka. Svoje praktične poskuse je seveda lahko izvajal le s pomočjo tekočine, prve hidravlične tekočine. To je bila seveda voda, ki se je uporabljala v zgodnjih začetkih hidravlike, šele kasneje so vodi začeli dodajati razne dodatke ali pa uporabljati druge tekočine. Shematski potek razvoja prikazuje slika 2.1.

Voda je bila tudi prva hidravlična tekočina, ki jo je Bramah uporabil v svoji prvi hidravlični stiskalnici leta 1795 [1], [4] in na naslednjih, ki predstavljajo začetek praktične uporabe hidrostatike. Tedaj drugih alternativ niso poznali, poleg tega pa ima voda kot hidravlična tekočina vrsto prednosti. To so predvsem majhna stisljivost (v področju tlakov v hidravlični opremi je praktično nestisljiva), negorljivost, neškodljivost tako za zdravje človeka kot tudi za okolje, cenenost in razpoložljivost. Glavni slabosti vode kot hidravlične tekočine pa sta slabe mazalne lastnosti ter nesposobnost zaščite pred korozijo. Zato so vodi že ob prvih poskusih uporabe, predvsem v zimskem obdobju, začeli dodajati glicerin, da so izboljšali njene mazalne sposobnosti.

Z namenom izboljšanja omenjenih slabosti, so vodi začeli dodajati različne dodatke (aditive), s katerimi so izboljšali zaščito pred korozijo in mazalne lastnosti. Na ta način je nastala ena od danes poznanih vrst težko vnetljivih hidravličnih tekočin HFAS, pri čemer dodatna oznaka S pomeni, da gre za tekočino na sintetični osnovi (S=solution→raztopina).

Leta 1910 so Armstrong, Williams in James razvili novo vrsto hidravlične črpalke, ki je zahtevala bistveno boljše mazalne lastnosti, kot jih je imela voda. Zato so kot hidravlični medij uporabili mineralno olje. Ker tedaj še niso poznali tesnil, ki bi bila združljiva z mineralnim oljem, mineralno olje pa ni bilo aditivirano, so bile uporabne dobe oljnih polnitev zelo kratke.



Slika 2.1: Shematski prikaz razvoja hidravličnih tekočin

Šele po letu 1930, ko so odkrili nitrilno gumo, ki je združljiva z mineralnim oljem, predvsem pa po letu 1940, ko so začeli uporabljati aditivirana mineralna olja (vsebovala so inhibitorje korozije in oksidacije), so se uporabne dobe oljnih polnitev podaljšale in tedaj so hidravlični sistemi postali konkurenčni mehanskim in električnim načinom prenosa moči.

Po letu 1950 se je začel intenziven razvoj težko vnetljivih vrst hidravličnih tekočin. Razlog za to je bilo nekaj nesreč v rudnikih, ki so imele za posledico tudi človeške žrtve. Danes poznamo štiri vrste težko vnetljivih hidravličnih tekočin, in sicer HFA, HFB, HFC in HFD. Pri vrsti HFA poznamo podvrsto HFAS, ki je že bila omenjena, pri podvrsti HFAE (E=emulsion→emulzija) pa je osnova mineralno olje z različnimi aditivi, ki jo mešamo z vodo in uporabljammo v približno 95 % koncentraciji. Vrsta HFB predstavlja tako imenovano inverzno emulzijo, kjer je mineralnega olja z aditivi več kot vode, katere delež znaša približno 40 %. Vrsta HFC predstavlja zmes poliglikolov, aditivov in vode, katere je približno 40 %. HFC tekočine ne vsebujejo mineralnega olja. Vrsta HFD ne vsebuje vode, običajno gre za povsem sintetično tekočino z različnimi aditivi. V primerjavi z mineralnim oljem ima vsaka vrsta težko vnetljive hidravlične tekočine kakšno pomanjkljivost, kar je cena za večjo varnost pred požarom, ki jo te tekočine omogočajo. Zaradi tega jih uporabljammo predvsem v metalurških obratih, rudnikih, premogovnikih in povsod, kjer obstaja večja nevarnost požara.

Vzporedno z razvojem težko vnetljivih vrst hidravličnih tekočin se je nadaljeval tudi razvoj mineralnih olj. Po letu 1960 se je začela uporaba HM in HV kvalitetnega nivoja

mineralnega olja, ki je še danes najpogosteji. Seveda pa na tržišče prihajajo vedno sodobnejši paketi aditivov, tako da kvaliteta mineralnega hidravličnega olja še vedno narašča.

Po letu 1990 se je zaradi naraščajočih zahtev glede zaščite okolja začela tudi uporaba biološko hitreje razgradljivih hidravličnih tekočin. Ta vrsta je prioritetno namenjena uporabi v kmetijstvu, gradbeništvu in gozdarstvu, torej tam, kjer obstaja neposredna nevarnost onesnaževanja okolja.

Zaradi številnih dobrih lastnosti vode ideja o njeni uporabi v hidravličnih sistemih nikoli ni povsem zamrla. Posameznim primerom je po letu 1995 sledila serijska proizvodnja sestavin za vodno hidravliko.

Dandanes v glavnem uporabljam mineralna olja različnih lastnosti, težko vnetljive tekočine (na bazi vode in sintetične), univerzalne tekočine za predležje, motor in hidravlični del. Poleg tega uporabljam tudi tekočine za posebne namene, v prehrambni industriji na primer združljive z živili, drugod morsko vodo, specifične zahteve morajo izpolniti tudi hidravlične tekočine za uporabo v letalih [2],[5]. Ponekod uporabljam tudi t.i. elektro reološke tekočine, ki dejansko so in niso tekočine, saj lahko spreminja svoje agregatno stanje [1].

2.3 Lastnosti hidravličnih tekočin

Zahteve glede kvalitete hidravličnih tekočin določajo konstruktorji hidravlične opreme, najpogosteje svetovno poznani proizvajalci batnih, krilnih in zobniških črpalk, kot so Sperry Vickers, Cincinnati Lanb Landis, Poclain, Hagglands Denison in drugi. Vendar sta imeli velik vpliv na razvoj kvalitete in trende na tržišču dve državni specifikaciji DIN in AFNOR. ISO in CETOP imata določen vpliv, vendar le z vidika klasifikacije maziv in terminologije, ki je v uporabi tudi še danes.

V praksi je potrebno pri izbiri hidravlične tekočine upoštevati dve pomembni pravili:

- zahtevano začetno in delovno viskoznost,
- vrsto hidravlične črpalke.

Vrsta in konstrukcija črpalke zelo vplivata na izbiro viskoznosti, čeprav so najpogosteje gradacije viskoznosti od ISO VG 32 do 100. Uporabnik mora upoštevati naslednja priporočila glede najvišje kinematične viskoznosti črpalke na sesalni strani pri zagotonu [6]:

- zobniška črpalka: $2000 \text{ mm}^2/\text{s}$,
- batna črpalka: $1000 \text{ mm}^2/\text{s}$,

- krilna črpalka: $500 \text{ mm}^2/\text{s}$.

Značilno najvišjo delovno kinematično viskoznost v odvisnosti pogojev uporabe in lokalno temperaturo medija znotraj hidravličnih naprav prikazuje preglednica 2.1.

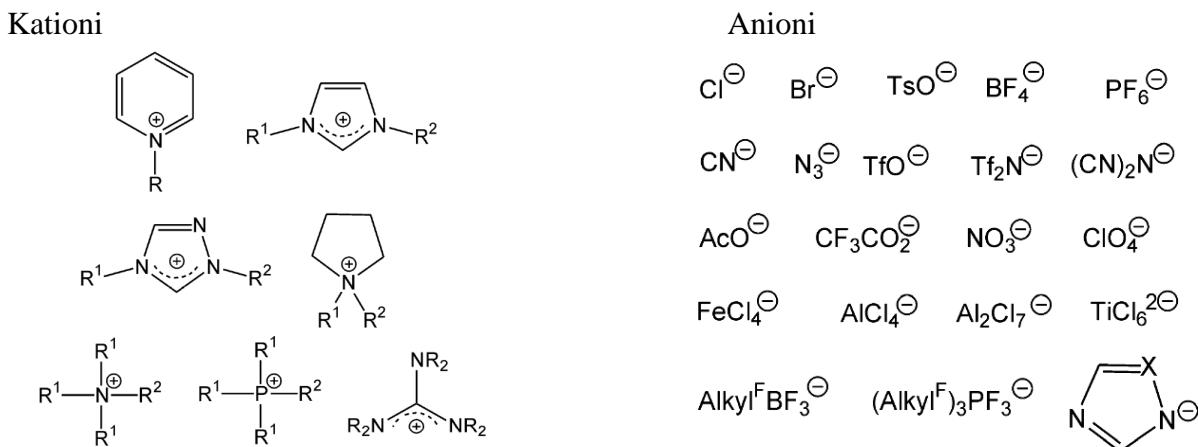
Preglednica 2.1: Viskoznost v odvisnosti od pogojev uporabe [6]

Pogoji dela sistema	Kinematična viskoznost	Običajna temperatura medija
visoki tlaki (400 bar)	Okoli $25 \text{ mm}^2/\text{s}$	$57 \text{ }^\circ\text{C}-90 \text{ }^\circ\text{C}$
nizki tlaki	$13-16 \text{ mm}^2/\text{s}$	$60 \text{ }^\circ\text{C}-70 \text{ }^\circ\text{C}$
mejna vrednost pri nizkem in zmernem tlaku	$10 \text{ mm}^2/\text{s}$	
mejna vrednost pri zobniški črpalki	$20 \text{ mm}^2/\text{s}$	

3 IONSKE TEKOČINE

Najprej pojasnimo izraz »ionske tekočine«. Poenostavljeni bi lahko dejali, da so ionske tekočine tekoče, oziroma staljene soli. Izraz ionske tekočine je bil uveden z namenom, da bi z njim pokrili sisteme pri temperaturah pod 100 °C. Eden od razlogov je bil, da bi se izognili besedam »staljena sol« v izrazih, kot je »temperatura okolice staljenih soli«, drugi ustvariti vtis hladnosti, tretji pa morda namera po patentiranju [7]. Ionska tekočina »je sestavljena v celoti iz ionov (staljen natrijev klorid; medtem ko je NaCl v vodi zgolj vodna raztopina ionov). Prej so to imenovali talina soli, kar daje predstavo o delu pri visokih temperaturah, z visoko viskoznim in korozivnim medijem« [8], [9].

Ionske tekočine s tališčem pri temperaturi okolice so sestavljene iz obsežnih in asimetričnih organskih kationov, kot so 1-alkil-3-metilimidazolij, 1-alkilpiridinij, 1-metil-1-alkilpirolidinij ali amonijevi ioni. Uporabljamo številne anione, od enostavnih halidov, ki znižujejo visoke temperature tališča, do anorganskih anionov kot so tetrafluoroborati in heksafluorofosfati ter do obsežnih organskih anionov, kot so bis(trifluorosulfonil)amidi, triflati ali tosilati [10]. Primer osnovnih struktur kationov in anionov prikazuje slika 3.1.



Slika 3.1: Osnovne strukture kationov in anionov v ionskih tekočinah [10]

Kationi (običajno organski) in anioni (običajno anorganski), prisotni v ionskih tekočinah so formulirani tako, da nastale soli težko kristalizirajo. Ionska tekočina je zato tekoča v širokem temperaturnem območju [10]. Pomembna značilnost ionskih tekočin je možnost prilagajanja njihovih fizikalnih in kemijskih lastnosti s spremenjanjem narave aniona in kationa. Število možnih kombinacij je ekstremno visoko in zaradi tega naj bi bilo možno »pričrtiti« najboljšo ionsko tekočino za vsak primer uporabe.

3.1 Osnovne lastnosti ionskih tekočin

Znanost o ionskih tekočinah je novonastala znanost. Vsak mesec znanstvene revije objavljajo poročila o sestavah novih ionskih tekočin. Seznam objav nenehno, potencialno raste. Znanje o fizikalnih, kemijskih in bioloških lastnostih številnih ionskih tekočin je v primerjavi s konvencionalnimi organskimi topili omejeno, čeprav narašča z izjemno hitrostjo.

Določitev lastnosti ionskih tekočin in trendov teh lastnosti so kritične za formuliranje ionskih tekočin za specifične potrebe. Za nekatere lastnosti, na primer parni tlak, je možno narediti posplošenje, ki zajema vse vrste ionskih tekočin. Za druge lastnosti posplošenje, ki bi zajemalo vse ionske tekočine ali določene vrste ionskih tekočin, trenutno ni možno.

Ena od impresivnih značilnosti ionskih tekočin je široka raznolikost njihovih lastnosti. Nekatere so na primer kisle, nekatere bazične in druge nevtralne. Nekatere lahko mešamo z vodo, druge ne. Nekatere so strupene oz. toksične, medtem ko druge niso. Te razlike v lastnostih odpirajo številne priložnosti za neodvisno spremicanje lastnosti kationov in anionov. Pridobivanje in primerjava fizikalnih, kemijskih in bioloških podatkov ionskih tekočin tudi zaradi samega števila raziskovanih ionskih tekočin predstavlja enormno delo. Veliko dosedanjih raziskav ionskih tekočin je bilo osredotočeno na tiste z imidazolijevimi kationi in zato neizogibno veliko doslej zbranih podatkov temelji na teh vrstah ionskih tekočin [9].

3.1.1 Tališče

Kaj razlikuje »ionsko tekočino« od staljene soli? V točki 3 je bilo že omenjeno, da se izraz ionska tekočina danes uporablja za soli z nizkim tališčem, običajno pod 100 °C ali celo pod temperaturo okolice. Vendar pa je bistvena razlika med ionskimi tekočinami in konvencionalnimi staljenimi solmi ta, da ionske tekočine najpogosteje vsebujejo organske katione. To omogoča ustrezno razlikovanje brez skrbi, da bi nekatere staljene soli lahko imele nižja tališča kot nekatere ionske tekočine [11].

Tekoče območje je pri ionskih tekočinah lahko veliko širše kot pri običajnih molekularnih topilih. Voda je na primer tekoča v območju 100 °C (0 do 100 °C), diklorometan pa v območju 135 °C (-95 °C do 40 °C). Na spodnjo temperaturno mejo, zgostitev (bodisi kristalizacijo ali osteklenitev) vpliva struktura in interakcija med ioni. Ionske tekočine, v celoti sestavljeni iz ionov in z relativno šibkimi pari ion-ion (v primerjavi s staljenimi solmi), nimajo parnega tlaka, oziroma je ta pod mejo detekcije. Za razliko od

molekularnih topil je zgornja meja tečenja ionskih tekočin običajno določena s temperaturo termične razgradnje, ne pa s temperaturo izparevanja. Temperature prehoda trdno-tekoče so pri ionskih tekočinah lahko (idealno) pod temperaturo okolice in celo do -100 °C. Najbolj učinkovita metoda za določanje temperature prehoda je diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC=Differential Scanning Calorimetry).

Na tališče ionskih tekočin vpliva velikost ionov in sicer tako anionov, kot tudi kationov (v splošnem večji ioni znižujejo tališče), poleg tega pa tudi simetrija kationov (naraščajoča simetrija viša tališče in obratno) in stopnja razvejenosti verig (pri bolj razvejenih verigah so tališča višja) [11], [9]. Prisotnost vode znižuje točko tečenja [12].

3.1.2 Parni tlak

Zanesljivih eksperimentalnih podatkov o parnih tlakih ionskih tekočin in njihovi temperaturni odvisnosti ni. Odsotnost merljivih parnih tlakov v območju temperatur do njihove termične razgradnje izvira iz močnih Coulomb-ovih sil med ioni v tekočini. Zanemarljiv parni tlak je ena od najbolj opevanih lastnosti ionskih tekočin, zaradi katere te ne izparevajo v reakcijskih kotlih in ne prispevajo k onesnaževanju zraka ali predstavljajo nevarnosti za zdravje v tem kontekstu.

Vendar je kljub temu pri visoki temperaturi in nizkem tlaku določene ionske tekočine možno destilirati. To so predvideli z uporabo eksperimentalnih podatkov o površinski napetosti in gostoti ionskih tekočin z NTf_2^- anioni in imidazolijevimi kationi z dolgimi alkilnimi verigami pri temperaturah med njihovim ocenjenim vreliščem in termično razgradnjo. Nato so destilacijo pri znižanem tlaku in 70 °C tudi izvedli [13].

V splošnem pa so parni tlaki ionskih tekočin pri temperaturah in tlakih okolice zanemarljivi, kar še zlasti velja za široko uporabljane imidazolijeve ionske tekočine s kratkimi kationskimi alkilnimi verigami. Kot posledica tega večina ionskih tekočin ne kaže znakov destilacije pod temperaturami njihove termične razgradnje [9].

3.1.3 Toplotna kapaciteta in prenos toplotne

Za konstruiranje in obravnavanje kemijskih reaktorjev, črpalk, opreme za prenos toplotne, kot so hladilni sistemi in druge industrijske opreme, je potrebno poznati termične lastnosti tekočin, ki jih uporabljamo v procesu. Te lastnosti vključujejo tališče, termično stabilnost, vrelišče in toplotno kapaciteto. Tekočine imajo v splošnem specifične toplotne kapacitete med

1,6 J/gK in 2,1 J/gK, tekočine z vezanim vodikom pa imajo višje vrednosti, voda na primer 4,186 J/gK. Leta 2003 je Holbrey s sodelavci objavil specifične toplotne kapacitete petih pogosto uporabljenih ionskih tekočin z imidazolijevimi kationi kot so [C₄mim]Cl, [C₄mim][PF₆], [C₂mim][PF₆], [C₄mim][NTf₂], ki so bile v območju 1,17 J/gK do 1,80 J/gK pri 100 °C in so linearno naraščale s temperaturo. Te vrednosti so primerljive z vrednostmi tekočin, ki jih uporabljamo za prenos toplote. Wilkes s sodelavci je nakazal možnost uporabe ionskih tekočin kot tekočin za prenos toplote. Določili so toplotne kapacitete in druge termične lastnosti treh ionskih tekočin: [C₂mim], [C₄mim][BF₄] in 1,2-dimetil-3-propilimidazolj bistriflamida. Ugotovili so, da so v več ozirih boljše kot pri konvencionalnih tekočinah za prenos toplote. Stabilne so na primer v širokem temperaturnem območju, imajo nizke parne tlake in lahko sprejmejo velike količine toplote [9].

3.1.4 Viskoznost

Glede viskoznosti poznamo dve široki skupini tekočin in sicer newtonske in nenewtonske. Newtonske tekočine imajo konstantno viskoznost ne glede na to, kakšna strižna napetost je prisotna, pri nenewtonskih pa se s spremembami strižne napetosti viskoznost poviša ali pa zniža. Čiste tekočine z nizko molekulsko maso so primeri newtonskih tekočin, polimeri, koloidne suspenzije in emulzije pa so primeri nenewtonskih tekočin [11]. Doslej so raziskovalci ionske tekočine obravnavali kot newtonske tekočine in objavljenih podatkov, ki bi obravnavali nenewtonske ionske tekočine, trenutno še ni. Res pa je, da v smeri iskanja nenewtonskih ionskih tekočin, doslej tudi ni bilo veliko vloženega truda.

Viskoznosti ionskih tekočin lahko merimo z enim od treh viskozimetrov: s padajočo kroglico, kapilarnim ali rotacijskim. Najpogosteje uporabljamo kapilarne in sicer zaradi nižje cene in relativne enostavnosti uporabe, medtem ko nam rotacijski viskozimetri potencialno lahko omogočajo sklepanje o newtonskem obnašanju ionskih tekočin.

Tako kot je izredno veliko število možnih ionskih tekočin, tako se tudi njihove viskoznosti lahko zelo razlikujejo in so običajno v območju od 0,035 do 0,500 Pas [12]. Podobno kot pri mineralnih oljih, ima temperatura tudi pri številnih ionskih tekočinah močan vpliv na viskoznost. V dosedanjih raziskavah se je pokazalo tudi, da imajo kontaminanti, predvsem voda (tudi majhna količina iz okoliškega zraka), zelo velik vpliv na izmerjene viskoznosti. Primerjave viskoznosti različnih ionskih tekočin, ki jih lahko najdemo v literaturi, so zato tvegane in nezanesljive.

3.1.5 Gostota

Gostota je za merjenje verjetno najbolj nezahtevna in nedvoumna fizikalna lastnost ionskih tekočin. V primeru, da razpolagamo s kvalitetno analitično tehnicno in volumetrično stekleno posodo, gostoto ionske tekočine lahko merimo gravimetrično (torej s tehtanjem vzorca). Objavljene gostote ionskih tekočin so v razponu med $1,12 \text{ g/cm}^3$ in $2,4 \text{ g/cm}^3$. Vpliv temperature na gostoto je bistveno manjši kot na primer na viskoznost. Podobno velja tudi za vpliv kontaminantov. Zadnje raziskave kažejo, da je vpliv kontaminantov na gostoto linearno odvisen od njihove vsebnosti. Sicer pa na gostoto ionskih tekočin najbolj vpliva kemijska sestava. Sledi vode v ionski tekočini delujejo kot topilo in zato znižujejo gostoto. Vendar imajo manjše količine relativno majhen vpliv [12].

3.1.6 Stisljivost

Stisljivost ima pomembno vlogo pri hidravličnih aplikacijah. Nizka stisljivost hidravlične tekočine omogoča visoke izkoristke in boljšo odzivnost strojev, ki obratujejo pri visokih tlakih. Preglednica 3.1 prikazuje, da je stisljivost ionskih tekočin v splošnem nižja kot pri mineralnih hidravličnih oljih in lahko celo nižja kot pri vodi [14].

Preglednica 3.1: Stisljivost ionskih tekočin v primerjavi z vodo in klasičnim hidravličnim oljem [14]

Hidravlična tekočina	$K [\text{Pa}^{-1}]$	Izguba volumna na 10 MPa [%]
Ionska tekočina 1	$3,4 \cdot 10^{-10}$	0,34
Ionska tekočina 2	$3,1 \cdot 10^{-10}$	0,31
Ionska tekočina 3	$4,0 \cdot 10^{-10}$	0,40
Ionska tekočina 4	$4,5 \cdot 10^{-10}$	0,45
Ionska tekočina 5	$5,0 \cdot 10^{-10}$	0,50
Ionska tekočina 6	$3,2 \cdot 10^{-10}$	0,32
Hidravlično olje	$1,0 \cdot 10^{-9}$	1,00
Voda	$5,0 \cdot 10^{-10}$	0,50

Nizka stisljivost ionskih tekočin je izredno zanimiva na primer pri membranskih črpalkah in hidravličnih preizkuševalnih napravah z visoko frekvenco obremenjevanja, kjer s pulzirajočimi obremenitvami povzročamo utrujanje materiala. Zaradi nizke stisljivosti so možne višje frekvence obremenjevanja.

3.1.7 Termično oksidacijska stabilnost in vnetljivost

Termična stabilnost je ključna zahteva za obratovalno tekočino v procesnih strojih. Ionske tekočine imajo velik potencial, saj so termogravimetrične analize in dolgi trajnostni testi pri visokih temperaturah in tlakih pokazali, da ima veliko ionskih tekočin visoko termično stabilnost, do temperatur med 250 °C in 400 °C. Zato jih že uporabljamo kot tekočine za prenos topote v topotnih izmenjevalnikih. Tako kot pri ostalih lastnostih ima tudi na termično stabilnost velik vpliv kemijska sestava ionov, medtem ko tlak praktično nima vpliva. Tudi testi vnetljivosti so potrdili visoko termično stabilnost ionskih tekočin, saj v splošnem niso nagnjene k vžigu [14].

Termično in oksidacijsko stabilnost ionskih tekočin so ocenjevali na osnovi sprememb kemijskih in fizikalnih lastnosti, kot so viskoznost, tvorjenje usedlin, izguba mase in totalno kislinsko število (TAN). Rezultate so analizirali s stališča kemijske strukture ionskih tekočin. TFSI derivati so pokazali dobro termično in oksidacijsko stabilnost v primerjavi z derivati BF4. Z naraščanjem dolžine verige alkilne skupine v imidazolijevih kationih se termična in oksidacijska stabilnost molekule zmanjšuje. Kontaminacija z vodo pospešuje termično oksidacijsko degradacijo ionskih tekočin [15].

Glede na navedeno, termična stabilnost ionskih tekočin ni omejujoč dejavnik v strojegradnji. Potrebno pa je izbrati tekočino, ki ustreza namenu uporabe.

3.1.8 Kemijska stabilnost

Kemijska stabilnost obratovalne tekočine je zelo pomembna z varnostnega vidika. Značilen primer je uporaba ionske tekočine za mazanje kisikovih kompresorjev, ki sicer zaradi nevarnosti eksplozije obratujejo brez maziva. Testiranje nekaterih ionskih tekočin pri tlačnih impulzih kisika pri 300 bar in pri visokih temperaturah do 250 °C je pokazalo, da je stabilnost ionskih tekočin zelo odvisna od kemijske strukture. Nekatere ionske tekočine so močno reagirale s kisikom, druge pa so bile popolnoma inertne in potem takem varne. To je moč razložiti s kemijsko strukturo ionov in njihovo termično stabilnostjo. Daljše stranske verige ionov povečujejo nagnjenost k reakciji s kisikom [14].

3.1.9 Sposobnost mazanja

Mazalne lastnosti ionskih tekočin so doslej testirali že velikokrat na razne načine. Pokazalo se je, da so v večini primerov boljše kot pri konvencionalnih mazivih. To lahko

razložimo z dejstvom, da imajo ionske tekočine edinstveno bipolarno strukturo, ki jim omogoča lahko adsorpcijo na drsne površine strojnih delov v kontaktu. Posledično pride do tvorbe učinkovitega mejnega filma, ki zmanjšuje trenje in obrabo. To še posebno velja pri nižjih kontaktnih tlakih ali večjih površinah.

3.1.10 Sposobnost zaščite pred korozijo

Korozija materiala lahko zmanjša učinkovitost proizvodnje, povzroča zastoje, manjšo proizvodnjo ali kontaminacijo izdelkov, povzroča izmet dragocenih virov, predimenzioniranje in zahteva drage vzdrževalne posege. Zato so že večkrat raziskovali korozjsko obnašanje različnih kovinskih materialov v ionskih tekočinah z različno kemijsko strukturo in sicer z vsebnostjo vode ali brez nje. Ena od raziskav [16] je zajemala korozjsko obnašanje ogljikovega jekla, avstenitnega nerjavnega jekla, zlitine na osnovi niklja C22, bakra, medenine in aluminija ($AlMg_3$) v sedmih ionskih tekočinah z različno kemijsko strukturo pri temperaturah do 90 °C. Nerjavno jeklo se je pokazalo odporno na korozijo tako ob prisotnosti vode, kot brez nje. Zlita C22 v splošnem ni korodirala, zmerna korozija se je pojavila v razredčeni ionski tekočini z dimetil fosfatnim anionom. Pri ogljikovem jeklu in aluminiju je korozivnost ionske tekočine močno odvisna od kemijske sestave kationa in narave aniona v molekuli. Anioni kot tosilati in dimetil fosfati običajno povzročajo večjo korozijo, še zlasti v ionskih tekočinah, razredčenih z vodo. V splošnem je aluminijeva zlita pokazala boljšo korozivno odpornost kot ogljikovo jeklo, predvsem pri ionskih tekočinah brez vode. Baker in medenina sta v ionskih tekočinah močno korodirala pri višjih temperaturah. Ugotovili pa so, da je možno z inhibitorji korozije razmere izboljšati [16].

Večina trenutno raziskovanih ionskih tekočin, primernih kot maziva, je sestavljena iz imidazolij alkil kationa in heksafluorofosfatnih ali tetrafluoroboratnih anionov. Čeprav imajo takšne ionske tekočine dobre protiobrabne in mazalne sposobnosti, pa je njihova uporaba izjemno omejena zaradi korozivnosti na kovinske materiale, kar je posledica lahke hidrolize njihovih anionov in tvorjenja fosforjeve ali borove kisline ob prisotnosti vode. Tako kot so fosfati eni izmed najbolj uporabnih aditivov pri mazalnih oljih, jih lahko uporabimo tudi za izboljšanje protiobrabnih in mazalnih lastnosti ionskih tekočin. V primeru, da jih uspemo uskladiti s kationi, ki niso nagnjeni k hidrolizi, je možno preprečiti tudi korozijo tornih parov [17].

3.1.11 Vpliv na zdravje ljudi in okolje

V zadnjem desetletju so ionske tekočine zaradi svojih odličnih fizikalno kemijskih lastnosti postale eden najhitreje rastočih »zelenih« medijev za kemike in inženirje. Možnosti uporabe teh izjemnih soli v reakcijah in ekstrakcijskih procesih so obširno raziskovali in pregledovali [18]. Ionske tekočine so pogosto povezane z besedo »zelen«. Ena od napovedi privzema, da je teoretično možno do 10^{18} snovi [19]. Skoraj nemogoče je, da bi vse snovi iz tako široke palete lahko smatrali kot zelene. Zato obstajajo ali bodo obstajale ionske tekočine, ki jih lahko pojemo in druge, ki so toksične za okolje, biološko niso razgradljive ali so celo trajne [19]. V splošnem je toksičnost ionskih tekočin odvisna od obeh ionov. Zelo pomemben je učinek dolžine verige alkilnih kationov, čeprav vrsta aniona prav tako vpliva na celotno toksičnost [20].

Do danes so pripravili in raziskovali veliko število ionskih tekočin. Mnoge od njih vsebujejo halogenirane anione, zato je njihova možnost uporabe omejena iz toksikološkega in ekološkega vidika. Da bi se izognili omenjenim omejitvam so pripravili tudi že tako imenovane bio ionske tekočine, sestavljeni v celoti iz bio materialov [21].

Postavlja se tudi vprašanje odstranjevanja ionskih tekočin. Podatke o uporabni dobi in možnosti recikliranja je za večino ionskih tekočin šele potrebno pridobiti. Ti podatki so ključnega pomena za oceno rentabilnosti proizvodnje in uporabo ionskih tekočin na dolgi rok. Potrebno je preučiti njihovo občutljivost na kontaminacijo, izpostavljenost procesnim pogojem in stopnjo razgradnje. Uporabna doba bi lahko vplivala na povraševanje po ionskih tekočinah in njihovo razpoložljivost [12].

Pogosto poročajo, da ionske tekočine niso vnetljive. To v resnici velja le do temperatur, pri katerih nastopi razgradnja. Nekatere ionske tekočine se začnejo razgrajevati že pri $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ druge pa so stabilne do skoraj $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri razpadu nastanejo nevtralne in hlapne molekule, ki seveda lahko gorijo. To pojasnjuje, zakaj imajo ionske tekočine v resnici plamenišče, pa čeprav je to običajno veliko višje od $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kakorkoli že, ionske tekočine zlahka odstranimo s sežigom, ki se običajno opravi pri temperaturi nekaj sto stopinj Celzija. Na teh zelo visokih temperaturah bodo tudi najtrdovratnejše organske ionske tekočine popustile [22].

3.2 Prednosti

Od poznih 1990-ih let ionske tekočine vzbujajo pozornost kemikov po vsem svetu zaradi različnih razlogov [9]:

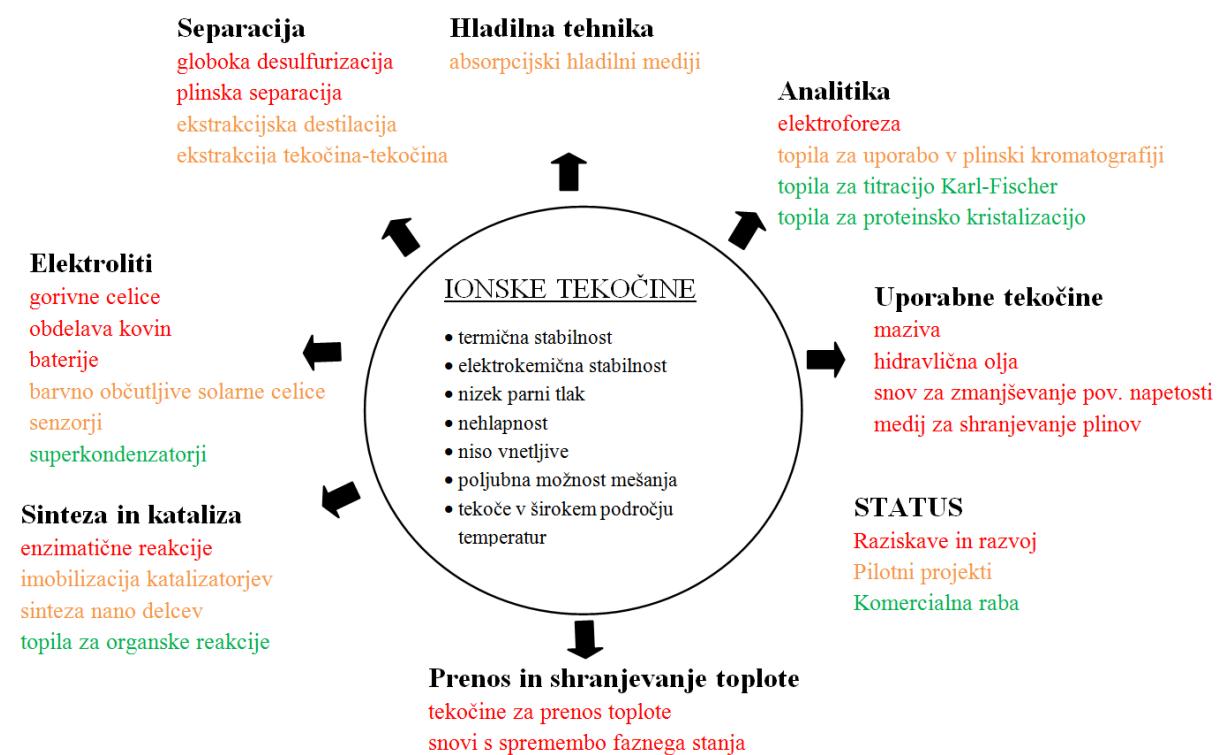
- Odprle so novo stran kemije.
- Znanstveni potencial za raziskavo ionskih tekočin je praktično neomejen. Doslej so v znanstveni literaturi poročali o več kot 1500 ionskih tekočinah. Teoretično je možno vsaj milijon enostavnih ionskih tekočin in skoraj neomejeno število sistemov ionskih tekočin, dobljenih z mešanjem dveh ali več enostavnih ionskih tekočin.
- Za razliko od organskih molekularnih topil imajo ionske tekočine zanemarljive parne tlake in zato pri normalnih pogojih ne izhlapevajo.
- Ionske tekočine v splošnem niso vnetljive in številne ostanejo termično stabilne pri višjih temperaturah kot konvencionalna organska molekularna topila.
- Ionske tekočine imajo širše področje temperatur, v katerem so tekoče, kot molekularna topila.
- Ionske tekočine imajo široko področje topnosti in sposobnosti mešanja. Nekatere so na primer hidrofilne, medtem ko so nekatere hidrofobne.
- Ionske tekočine imajo široko elektrokemično okno.
- Ionske tekočine lahko uporabimo kot reakcijski medij in/ali katalizator za širok spekter kemičnih reakcij.
- Ionske tekočine lahko uporabimo za ločevanja in ekstrakcije kemikalij iz vodnih in molekularnih organskih topil.
- Ionske tekočine lahko po uporabi kot topilo in/ali katalizator enostavno recikliramo.
- Fizikalne, kemijske in biološke lastnosti ionskih tekočin lahko »prikrojimo« na več načinov:
 - s spremembou anionov in kationov,
 - z načrtovanjem specifičnih namembnosti v kationih in/ali anionih,
 - z mešanjem dveh ali več enostavnih ionskih tekočin.
- Ker so ionske tekočine sestavljene iz kationov in anionov, imajo dvojno funkcionalnost. Zaradi tega dajejo unikatno arhitekturno platformo v primerjavi z molekularnimi tekočinami. Posledično lahko ionske tekočine uporabimo kot topila in nove materiale za širok spekter namenov na primer v elektrokemiji, organski kemiji, anorganski kemiji, biokemiji, znanosti o materialih in farmaciji.
- Ionske tekočine lahko pomembno prispevajo k razvoju zelene kemije in zelene tehnologije, na primer z:
 - zamenjavo toksičnih, vnetljivih in hlapljivih organskih topil,
 - zmanjšanjem ali preprečevanjem kemičnih ostankov in onesnaževanja,

- izboljšanjem varnosti kemičnih procesov in izdelkov.

3.3 Možnost uporabe v industriji

Zaradi številnih dobrih lastnosti ionskih tekočin in nekaterih prednosti pred konvencionalnimi tekočinami je razumljivo, da so doslej raziskovali njihovo možnost uporabe na različnih področjih tehnike.

Slika 3.2 z barvami semaforja prikazuje status ionskih tekočin na različnih področjih industrije [23]. Vidimo, da se delno uporablajo tudi že v praksi. Uporabljamo jih v kemijski sintezi in separaciji, proizvodnji celuloze, predelavi nafte, formuliranju barv, nuklearni in solarni energiji, shranjevanju vodika, predelavi odpadkov in proizvodnji baterij [24]. V fazi raziskav in razvoja je tudi njihova uporabnost za prenos in shranjevanje toplote [25]. Tudi področje uporabnih tekočin, kamor uvrščamo maziva in hidravlična olja, je še v fazi raziskav in razvoja.



Slika 3.2: Potencialna področja uporabe ionskih tekočin [23]

Danes raziskovalci (Siedlicka in ostali [26]) skušajo odgovoriti na vprašanja v zvezi s stabilnostjo ionske tekočine v praktičnih aplikacijah, kjer prihaja do degradacije zaradi različnih fizikalno kemijskih pogojev, kot so visoka temperatura, obsevanje, različna električna gostota toka, katalizatorji oksidacije. Želijo ugotoviti, kako struktura kationov in

anionov, kakor tudi nečistoče (na primer voda), vplivajo na stabilnost ionskih tekočin v uporabi.

Navajajo tudi primer uspešne industrijske uporabe ionske tekočine kot tekočega bata v plinskem kompresorju [27].

Raziskav o potencialnih možnostih uporabe ionskih tekočin kot maziv je bilo doslej že precej in so na kratko povzete v nadaljevanju.

3.4 Ionske tekočine kot napredna maziva-stanje tehnike

Ionske tekočine so zaradi številnih dobrih lastnosti, opisanih v točki 3.2, idealni kandidati za nova maziva, primerna za uporabo v težkih pogojih, kjer konvencionalna olja in masti ali trdna maziva odpovedo. Nekaj študij s tega področja je bilo doslej že opravljenih.

Izbira kationa in aniona v ionski tekočini ter oblikovanje stranskih verig iona določajo osnovne lastnosti ionskih tekočin, kar omogoča kreiranje prilagojenih maziv in aditivov za maziva [28]. Prvič so bile ionske tekočine kot zelo obetavna visoko zmogljiva maziva omenjene leta 2001 [29], v zadnjih letih pa so na področju tribologije vzbudile veliko zanimanje. Velika večina raziskovanih kationov na tem področju so derivati 1,3-dialkilimidazolija z višjo alkilno skupino na imidazolijevem kationu, kar omogoča dobre mazalne lastnosti, vendar znižuje termično in oksidacijsko stabilnost. Hidrofobni anioni omogočajo dobre mazalne lastnosti ter dobro termično in oksidacijsko stabilnost [30].

Tribološke raziskave z večinoma ohrabrujočimi rezultati so zajemale naslednje pare materialov: aluminij-jeklo, jeklo-jeklo, jeklo-baker, jeklo-SiO₂, Si₃N₄-SiO₂. Med lahkimi zlitinami so največkrat proučevali kombinacijo jeklo-aluminij, predvsem zaradi široke uporabnosti v drsnih kontaktih, še zlasti v avtomobilski industriji. Te in ostale raziskave so pokazale, da številne prednosti uporabe ionskih tekočin vključujejo:

- zmanjšanje parazitskih izgub energije zaradi zmanjšanja trenja,
- podaljšanje uporabne dobe in vzdrževalnih intervalov zaradi zmanjšanja obrabe,
- razširjeno visokotemperaturno področje uporabe maziv zaradi visoke termične stabilnosti,
- varnejši prevoz in skladiščenje zaradi nevnetljivosti.

Dodatno ionske tekočine ne izparevajo kot večina ostalih tekočin, kar je še eden od razlogov za lepe obete glede njihove uporabe kot maziva. Študije so zajemale tako uporabo 100 % ionskih tekočin, kot tudi uporabo ionskih tekočin kot aditivov. Nerazredčene ionske tekočine omogočajo večje znižanje trenja, medtem ko nizek delež ionskih tekočin v obliki

aditiva na površini lahko tvori dovolj stabilne sloje, ki prav tako učinkovito zmanjšujejo obrabo [24]. Alkil imidazolij tetrafluoroborati so obetavna maziva za stike jeklo-jeklo, jeklo-aluminij, jeklo-baker, jeklo-SiO₂, Si₃N₄/SiO₂, jeklo-Si(100), jeklo-sialon keramika in Si₃N₄/sialon keramika. Pokazalo se je, da odlično zmanjšujejo trenje, imajo sposobnost zaščite pred obrabo in visoko nosilnost [31].

Raziskovali so tudi uporabnost nekaterih ionskih tekočin za mazanje stikov jeklo-aluminij pri nizkih in visokih temperaturah (-30 °C, 100 °C in 200 °C). Mazalne lastnosti so odvisne od termične stabilnosti, polarnosti molekul, njihove sposobnosti tvorjenja urejenih adsorbiranih slojev in tribokorozjskih procesov v kontaktu. Konvencionalna maziva zaradi termične razgradnje odpovejo pri temperaturah nad 150 °C, daljše alkilne verige 1-heksil, 3-metil imidazoilj tetrafluoroboratov pa zagotavljajo učinkovito ločevanje površin pri vseh temperaturah. Pri -30 °C se pojavi večje trenje in obraba le ob prisotnosti vode in sicer zaradi intenzivne abrazije [32].

Da bi našli primerno ionsko tekočino za uporabo v pogojih, kot so na primer visok vakuum, ekstremne temperature in visoki tlaki, je potrebno testirati veliko število ionskih tekočin pri različnih pogojih. Doslej so pri testiranjih pogosteje uporabljali reaktivne ionske tekočine kot aditiv, nerazredčene pa zaradi nevarnosti tribokorozije (predvsem v primeru ionskih tekočin z vsebnostjo fluora) redkeje. Sinergijski učinek in dolgoročno stabilnost teh zmesi je potrebno še raziskati [28].

Nekatere ionske tekočine so primerne tudi kot odlično mazivo v vakuumu. Trenutno uporabljana maziva v vesoljski tehniki temeljijo večinoma na super rafiniranih mineralnih oljih, poliol estrih, perfluoropolietrih (PFPE) in alkiliranih ciklopentanih. Njihova slabost je omejena uporabna doba v vakuumu, na primer katalitična degradacija PFPE na kovinskih površinah, visok parni tlak mineralnih olj pri visokih temperaturah, prekinjanje tankega filma pri alkiliranih ciklopentanih. Ugotovili so, da so alkil imidazolij tetrafluoroborati pri testiranju trenja in obrabe parov jeklo-jeklo na zraku in v vakuumu ($1 \cdot 10^{-3}$ Pa) boljša maziva od omenjenih. Pri trenju ionske tekočine tvorijo zaščitni film, sestavljen pretežno iz FeF₂ in B₂O₃, ki prispeva k nižjemu trenju in obrabi [33].

3.4.1 Vpliv anionov in kationov na mazalne lastnosti

Potrebno je poudariti, da lastnosti anionov in kationov v realni ionski tekočini, zaradi njihovega medsebojnega vplivanja, ne moremo ločevati. Z vidika kategoriziranja triboloških lastnosti, na katere imajo dominanten vpliv anioni in kationi, pa je takšna delitev uporabna.

V splošnem lahko **anione** razvrstimo na halogenirane in nehalogenirane. Večina **halogeniranih anionov**, še zlasti fluoriranih, ni primerna kot mazivo. Sicer imajo halogenirani anioni dobre mazalne lastnosti zaradi tvorjenja sloja halida, kot na primer FeF_x na površini jeklenih materialov [34], [35]. Vendar v prisotnosti vode anion hidrolizira in se tvori agresivni vodikov halid, na primer HF. To povzroči zelo visoko trenje in obrabo zaradi korozije in degradacije jeklenega materiala. To so ugotovili pri popularnih anionih, kot so NTf_2^- , BF_4^- ali PF_6^- . Pri NTf_2^- je velika ovira za uporabo kot mazivo tudi visoka cena in visoka toksičnost [28], [34], [35], [36]. Tu ima posebno mesto PF_6^- anion. Izkazalo se je, da ima lahko izjemne mazalne lastnosti v primerjavi z ostalimi halogeniranimi anioni. Zaradi fosforja v molekularni strukturi deluje proti obrabno in kot inhibitor korozije. Na površini se tvori fosfatni film, ki preprečuje nastanek Fe-halida in izboljšuje odpornost proti obrabi [28]. Dodajanje inhibitorjev korozije, kot tri krezil fosfat, v čisto ionsko tekočino, lahko omogoči dobre mazalne lastnosti ionske tekočine s halogeniranimi anioni in tvorjenje zaščitnega površinskega fosfatnega filma [37]. Vendar je PF_6^- -anion nagnjen k hidrolizi in se v stiku z vodo v kratkem času razgradi.

Zaradi negativnih učinkov večine halogeniranih anionov, uporabljenih v ionskih tekočinah (toksičnost, neodpornost na vodo, korozija, visoka obraba), je močno priporočljiva uporaba ionskih tekočin z **nehalogeniranimi anioni**. Doslej so že uporabili **metil sulfatni anion** (MeSO_4^-) kot aditiv za mazivo na osnovi glicerola. Najboljše rezultate so dobili z najnižjo testirano koncentracijo (0,625 ut. %). V tem primeru se je trenje zmanjšalo za 30 do 50 %, obraba pa je bila 2,5 do 4,6 krat manjša kot pri čistem glicerolu, odvisno od uporabljenega kationa v ionski tekočini [38], [39]. Ta vrsta ionske tekočine se torej zdi primerna kot aditiv v poli-alkoholnih matrikah, saj je aktivna že v koncentracijah nižjih od 1 utežnega %. Vendar metil-sulfatni anion hidrolitsko ni stabilen in po izkušnjah našega dobavitelja ionskih tekočin, podjetja Proionic GmbH, v daljšem časovnem obdobju povzroča korozijo. Pri uporabi **anionov s fosforjem** se je že izkazalo, da je dimetilimidazolij dimetil fosfat slabše mazivo, kot ionske tekočine s halogeniranimi anioni [37]. Uporabili so tudi že različne ionske tekočine s fosforjevimi skupinami v anionih in/ali kationih. V primerjavi s standardnimi protiobrabnimi aditivi so glede trenja in obrabe dobili enake ali boljše rezultate z 1 % dodatka ionske tekočine. Najboljše rezultate so dobili, ko je bil fosfor prisoten v anionu in v kationu [40]. Primerljive rezultate je dobil Zhang s sodelavci, ki tudi ni ugotovil korozije pri uporabi dialkil fosfatnih ionskih tekočin in močno korozijo pri uporabi BF_4^- ali PF_6^- kot anionov [17], [41]. Somers s sodelavci [42] je uporabil kot mazivo tri-heksil (tetradekil) fosfonijev kation z različnimi disubstituiranimi fosfati in tudi tradicionalnimi (halogeniranimi)

anioni kot proti ion pri testih z jeklenimi kroglicami. V primerjavi z motornim oljem SAE 15W-50 kot referenčnim mazivom so glede trenja in obrabe dobili boljše rezultate z uporabo difenil fosfatnega (DPP) aniona. Slabše se je izkazala ionska tekočina z dibutil fosfatom kot anionom, vendar še vedno bolje kot referenčno olje [42], [43]. To nakazuje, da so aromatski fosfatni anioni v tribologiji boljši od alifatkih. Pokazali so tudi, da lastnosti ionske tekočine kot maziva niso odvisne le od aniona. Velik vpliv ima tudi uporabljeni obremenitev. Pri nizkih obremenitvah je imel DPP boljše lastnosti kot NTf₂. To se je spremenilo, ko so uporabili višje obremenitve [44].

Antzutkin s sodelavci [45] je uporabil tudi razne ionske tekočine z različnimi **boratnimi anioni**. V vseh primerih je bil kot kation uporabljen tri-heksil (tetradekil) fosfonij. Te ionske tekočine so uporabili kot mazivo in rezultate testiranj primerjali s standardnim motornim oljem SAE 15W-50. Ionske tekočine so imele nižje koeficiente trenja v vseh primerih in pri različnih obremenitvah. Vendar pa viskoznosti teh boratnih ionskih tekočin pri sobni temperaturi presegajo 1000 mm²/s. Tudi Totolin in ostali [46] so z dodatkom ionske tekočine na osnovi fosfata pomembno izboljšali tribološke lastnosti ionskih tekočin na osnovi imidazolijevega borana.

Tudi uporabljeni **kationi** v ionskih tekočinah za mazanje so bili doslej različni. Ene najbolj običajnih vrst ionskih tekočin so na osnovi **imidazolijevih kationov**. Qu s sodelavci [47] je ugotovil, da je trenje teh tekočin višje kot pri primerjanih klasičnih oljih. Fox in Priest [37] sta ugotovila, da ni trenda nižanja ali naraščanja trenja in/ali obrabe, če uporabimo različne dolžine verig imidazolijevega kationa. Kot mazivo doslej niso uporabili le »normalne« 1,3-dialkil imidazolijeve katione. Zhu in sodelavci [48] so sintetizirali imidazolijeve ionske tekočine, kjer so dodali funkcionalnost estra na eni strani obroča. Na drugi strani je bila standardna alifatska veriga. Za njihove ionske tekočine so uporabili halogenirane anione. Kot referenco so uporabili PFPE (perfluoro- polietre) in BMIM-BF₄. Rezultati njihovih novih ionskih tekočin so bili boljši kot pri PFPE vendar slabši kot pri BMIM-BF₄. Po testu so bile vidne enake težave, kot jih poznamo pri večni ionskih tekočin s halogeniranimi anioni (na primer korozija).

Li in ostali [49] so uporabili drugo funkcionalnost – hidroksilno skupino na kationu. V končni fazi so dobili skoraj enke rezultate kot Zhu s sodelavci. Dobili so malo višji koeficient trenja in boljše protiobrabne lastnosti kot pri nefunkcionaliziranih ionskih tekočinah. Li s sodelavci [50] je testiral tudi druge funkcionalizirane imidazolijeve tetrafluoroborate BF₄⁻. Uvedli so vinilno skupino na eni strani imidazolijevega obroča, vendar niso uspeli proizvesti ionske tekočine z boljšimi mazalnimi lastnostmi. S standardnimi imidazolijevimi

tetrafluoroborati so namreč lahko opravili tribološke teste z obremenitvijo 1200-1600 N, z novimi funkcionaliziranimi ionskimi tekočinami pa le teste z obremenitvijo pod 500 N. Funkcionaliziranje imidazolijevih kationov bi bil v nekaterih primerih lahko koncept za ionske tekočine, uporabne kot mazivo.

Qu s sodelavci [51] je z ionskimi tekočinami na osnovi **amonijevih kationov** dobil nižje trenje in obrabo v primerjavi z običajno uporabljenimi olji. To niso ugotovili le za čiste tekočine, temveč tudi v primeru, ko so jih uporabili kot aditiv običajnemu olju (10 utežnih %). Kot anione so v teh tekočinah uporabili NTf_2^- , ki lahko povzročijo prej omenjene probleme s korozijo.

Ionske tekočine s **fosforjevimi kationi** so se v primerjavi z ionskimi tekočinami z amonijevimi kationi izkazale za superiorne [40]. Lawes in ostali [52] so testirali ionske tekočine na osnovi **holina** (2-hidroksietil-trimetil-amonij) in rezultata primerjali s standardnim motornim oljem SAE 5W-30. Primerjane ionske tekočine so imele enak koeficient trenja. Vendar se je koeficient trenja že po kratkem času zvišal na nivo kot pri suhem drsnem testu brez olja. Tovrstne ionske tekočine zato niso primerne kot maziva.

Jiang in ostali [36] so uvedli novo vrsto kationov ionskih tekočin, primernih kot maziva, to je **kronska vrsta kationov**. Sintetizirali so nekaj ionskih tekočin s kationi pridobljenimi iz kronskih etrov z bis (2-etilheksil) fosfatom kot anionom. Nove ionske tekočine so imele boljše torne in protiobrabne lastnosti kot običajna maziva, na primer X1-P in PFPE. Možno jih je uporabiti tudi pri visokih obremenitvah.

Nekateri avtorji so raziskovali tudi **ionske tekočine s fosforjem v kationu in anionu** Omenjen je bil že Somers s sodelavci [42]. Tudi Yu s sodelavci [35] je sintetiziral nekatere fosfonijeve alkilfosfate in jih testiral kot aditive za običajna mazalna olja. Primerjava rezultatov teh zmesi s čistim baznim oljem je pokazala pomembno zmanjšanje trenja in obrabe. Ionske tekočine so bile tudi termično bolj stabilne kot standardna maziva in niso bile korozivne na zlitine.

3.4.2 Uporaba nerazredčenih ionskih tekočin

Širša raziskava trenja in obrabe v okviru ocene ionskih tekočin kot maziv je zajemala 15 čistih ionskih tekočin različnih kemičnih struktur v kontaktu jeklo-jeklo. Meritve so bile opravljene z oscilirajočim tribometrom z geometrijo kroglica na disku pri 30 °C, 100 °C in 170 °C. Primerjalni testi so bili opravljeni s štirimi referenčnimi mazalnimi olji. Rezultati ionskih tekočin so bili zelo različni. Nekatere so se izkazale bolje kot referenčna olja. Poleg

mazalnih lastnosti so ugotavljali tudi termično stabilnost in korozivnost na baker pri različnih temperaturah. Večina ionskih tekočin se je pri 100 °C izkazala kot termično stabilne, pri 150 °C pa le nekatere [53].

Opravili so tudi že testiranje dveh ionskih tekočin kot mazivi za valjanje aluminija. To sta bili 1-etil-3-metil imidazolij bis(trifluorometilsulfonil) imid (EMI Im) in 1-butil-3-metil imidazolij heksafluorofosfat (BMIM PF₆), referenčni olji pa na osnovi polialfaolefina (PAO). Določali so gostoto, viskoznost, indeks viskoznosti, termično stabilnost, tlačno viskoznostni koeficient in mejno strižno stabilnost. Ostali testi so zajemali določanje topnosti običajnih proti obrabnih in aditivov za visoke tlake, EP lastnosti in Stribeckove krivulje. Ugotovili so podobne fizikalno kemijske lastnosti obeh ionskih tekočin in referenčnih olj, a bistveno slabšo topnost običajnih aditivov za maziva v obeh ionskih tekočinah, kar je v obravnavanem primeru velika pomanjkljivost, ki bi jo morda lahko odpravili z drugačno strukturo molekul [54].

Čiste ionske tekočine vzpostavijo tribološki film, ki se fizično adsorbira in/ali kemično reagira s kovinskimi površinami ter na ta način učinkovito zmanjšuje trenje in obrabo v področju mejnega mazanja. Toda v nekaterih okoliščinah, ko kontaktni površini reagirata med seboj, čiste ionske tekočine niso primerne zaradi njihove električne prevodnosti [24].

Ionske tekočine so izjemne zaradi svoje visoke kemične inertnosti in dobrih mazalnih lastnosti. Zelo obetavno področje je mazanje kisikovih kompresorjev, kot alternativa kompresorjem brez mazanja, ki jih je sicer potrebno uporabljati zaradi izredno visoke reaktivnosti čistega kisika z organskimi mazivi. Doslej so že opravili pregled ustreznih parametrov, vključno s termično stabilnostjo, vnetljivostjo, kemično inertnostjo do čistega kisika, topnostjo kisika, korozivnostjo in tribološkimi lastnostmi. Na osnovi dobljenih rezultatov so izbrali najbolj primerno ionsko tekočino in jo uporabili v vijačnem kompresorju, ki je dosegel končni tlak 30 bar s kapaciteto do 200 Nm³/h [55], [56].

Pri testiranju dveh nerazredčenih ionskih tekočin z metil-sulfatnim anionom niso ugotovili bistvenih razlik v mazalnih lastnostih, trenje pa je bilo okoli 60 % manjše kot pri čistem glicerolu in obraba približno 4-krat manjša [38].

Za širšo komercialno uporabo bodo morale ionske tekočine izpolniti tudi dodatne zahteve, kot so sprejemljiva cena, stabilnost, netoksičnost in neškodljivost za okolje.

3.4.3 Ionske tekočine kot aditiv

Doslej so raziskovali tudi uporabnost ionskih tekočin kot mazalnega aditiva v vodi in mazalnih oljih. Z dodatkom vodi ionske tekočine zmanjšajo začetno obdobje visokega trenja v drsnih kontaktih keramika-keramika. Pri dodajanju mastem, ionske tekočine ob sinergijskem učinku z aditivi v masteh bistveno izboljšajo lastnosti. Kadar jih dodamo mineralnim oljem se obraba bolj zniža pri ionskih tekočinah s krajšimi alkilnimi verigami. Pri dodatku sintetičnim oljem se pri 100 °C znižata tako trenje kot obraba [24]. Nedavno so ocenjevali uporabnost dikationskih bisimidazolij ionskih tekočin z enako dolgimi stranskimi verigami kationov in različnimi anioni pri sobni temperaturi. Rezultati so pokazali, da lahko učinkovito znižajo trenje in obrabo drsnih parov jeklo-jeklo. Odlične tribološke lastnosti ionskih tekočin kot aditivov so posledica:

- tvorjenja fizikalno adsorbiranih filmov, podobno kot pri modifikatorjih trenja,
- tvorjenja tribokemičnih produktov med trenjem, ki ustvarijo protiobrabni mejni film [57].

Doslej se je pokazalo, da imajo posebne ionske tekočine velik potencial za uporabo kot aditiv v triboloških aplikacijah. Rezultati obljudljajo visoke nosilnosti, zlasti kationa 3-oktiltiazolij in dolgoročno stabilnost do temperature 120 °C. Vendar pa so z izbrano preskusno metodo podrobno proučili le preprečevanje obrabe pri ekstremnih tlakih [58].

Szarvas s sodelavci [59] je pripravil različne imidazolijeve ionske tekočine z dialkil tiofosfatnimi anioni. Te ionske tekočine so uporabili kot aditiv za običajna maziva (na primer standardno bazno olje, kot je Palatinol 10P). Navajajo tudi, da se te ionske tekočine lahko uporabijo kot aditivi za druge ionske tekočine. Z uporabo 0,3 do 5 utežnih % ionske tekočine v baznem olju so dobili boljše torne in protiobrabne lastnosti kot s čistim baznim oljem.

3.4.4 Aditivi za ionske tekočine

Podobno kot pri mineralnih in sintetičnih oljih je tudi ionske tekočine potrebno optimirati z aditivi, da bi lahko zadostile zahtevam praktične uporabe. Ti aditivi so lahko druge ionske tekočine ali pa katere druge snovi. Obstaja veliko cenovno sprejemljivih aditivov za maziva, ki pa so jih razvili večinoma za mineralna olja in v ionskih tekočinah niso topni. Nasičene alifatske spojine se v splošnem ne mešajo dobro z ionskimi tekočinami, boljše je mešanje z olefini, najboljše pa z aldehidi. Vpliv aditivov na zmanjšanje trenja in obrabe je izredno odvisen od čistosti ionskih tekočin in se lahko razlikuje tudi do petkrat. Za zmanjšanje

korozivnosti bolj reaktivnih ionskih tekočin - zlasti tistih, ki vsebujejo fluorove anione, so se raziskave osredotočile na dodatke za zmanjšanje obrabe in korozije. Zanimiv je bezotriazol, ker je njegova molekularna struktura podobna kot pri ionskih tekočinah [24].

Pri mejnih pogojih mazanja so že raziskovali različne ionske tekočine, sestavljene iz kationov kot so imidazolij, piridinij, amonij in anionov kot BF_4^- in bis(trifluorometilsulfonil) imid (TFSI^-). Ugotovili so, da so tribološke lastnosti ionskih tekočin boljše kot pri konvencionalnih mazivih kot so sintetični ogljikovodiki, sintetični estri in fluorirani etri. Podrobne analize obrabljene površine so razkrile, da je pri teh pogojih prišlo do tribokemičnih reakcij ionskih tekočin. Ugotovili so na primer prisotnost organskega fluorida, železovega fluorida, železovega sulfata, ki izvirajo iz sestave aniona v ionski tekočini. Tri-krezil fosfati (TCP) in dibenzil disulfidi (DBDS) izboljšujejo protiobrabne lastnosti ionskih tekočin [60].

Kot aditiv za dve ionski tekočini (na osnovi imidazolija in amonija) so uporabili 0,3 % lauril poliglikol (3EO) eter fosfata. Pri temperaturah od sobne do 70 °C sta ionski tekočini imeli 40 do 45 % nižji koeficient trenja kot brez tega aditiva [61].

Primer uporabe ionskih tekočin kot aditiv sta na primer imidazolij in amonij polistiren sulfonat. S 3 % dodatka teh polimernih ionskih tekočin korozivni ionski tekočini, kot je EMIM- MeSO_3^- , so popolnoma preprečili korozijo. Ti ionski tekočini sta bili uporabljeni tudi kot modifikator viskoznosti [62].

3.4.5 Ugotovitve o trenutnem stanju razvoja na področju maziv

V nadaljevanju lahko povzamemo zgoraj zapisane ugotovitve o dosedanjih raziskavah uporabnosti ionskih tekočin kot maziv. Ionske tekočine z vsebnostjo halogenov kot maziva niso uporabne zaradi korozije, toksikoloških pomislekov in slabe hidrolitske stabilnosti. Nehalogenirane ionske tekočine z vsebnostjo fosforjevih ionov imajo prednost pred ostalimi, še zlasti kadar je fosfor prisoten tako v anionu kot v kationu. Fosfonijevi kationi so bolj stabilni kot amonijevi in imidazolijevi. Tri-heksil (tetradekil) fosfonijevi borati imajo obetavne lastnosti, a imajo (pre)visoke viskoznosti. Ionske tekočine lahko uporabimo tudi kot aditiv v konvencionalnih oljih. Molekularni aditivi kot trikrezil fosfat ali lauril poliglikol (3EO) eter fosfat lahko izboljšajo tribološke lastnosti ionskih tekočin, prav tako tudi specialne ionske tekočine na osnovi dialkil tiofosfata ali na osnovi polimerov kot so imidazolijevi in amonijevi polistiren sulfonati.

Klub zelo hitremu naraščanju strokovnih prispevkov s področja ionskih tekočin, pa v splošnem ne obstaja literatura, ki bi zajemala ne le posamezne lastnosti, temveč večino

vidikov uporabljenih maziv, na primer obrabo, trenje, točko zavaritve, penjenje, ločevanje plinov, korozijo v tankem in debelem filmu, površinsko napetost, omočenje, termično stabilnost, kemijsko stabilnost, strižno stabilnost, reologijo, indeks viskoznosti, lastnosti pri visokih obremenitvah, plamenišče, specifično topotno kapaciteto, topotno prevodnost itd.

3.5 Ionske tekočine kot hidravlične tekočine-stanje tehnike

Medtem ko je bilo raziskav o možnosti uporabe ionskih tekočin za mazanje doslej že kar precej in so bile omenjene v točki 3.4, pa so bile doslej le redke raziskave, kjer so proučevali možnosti uporabe ionskih tekočin v hidravličnih napravah. Poleg dobrih mazalnih lastnosti morajo ionske tekočine kot medij, primeren za uporabo v visokotlačnem hidravličnem sistemu, imeti tudi druge dobre lastnosti. Za široko komercialno uporabo morajo izpolnjevati številne posebne zahteve, na primer, da nimajo negativnega vpliva na zdravje ljudi, dobro termično in kemijsko stabilnost, nizko korozivnost na običajno uporabljane materiale industrijskih sestavin. Za uporabo v visokotlačnih aplikacijah morajo imeti nizko stisljivosti in prilagodljivo topnost plinov. Kemijska in termična stabilnost ter nevnetljivost so ključne zahteve za obratovalne tekočine v procesnih napravah na splošno in še posebej v visokotlačnih hidravličnih strojih. Uporaba ionskih tekočin ima velik potencial, saj se štejejo za dokaj stabilne v širokem tekočem območju, kar je zelo pomembno za uporabo v visokotlačnih hidravličnih sistemih, ki obratujejo v različnih temperaturnih področjih. Zaradi tega so že bile uporabljeni kot tekočine za prenos toplotne v topotnih izmenjevalnikih (ki so tudi del hidravlične pogonske enote). Z dinamičnega vidika hidravličnega sistema, z vgrajeno ionsko tekočino, je potrebno posebno pozornost nameniti stisljivosti uporabljenih tekočin. Nizka stisljivost omogoča visok izkoristek in boljše odzive visokotlačne naprave. Na splošno veljajo ionske tekočine za zelo nestisljiv medij – stisljivost je nižja od standardnega hidravličnega mineralnega olja in celo nižja od vode ($5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$). To pomeni, da so ionske tekočine zelo zanimive za hidravlične aplikacije, kot so membranske črpalka ali dajalniki impulsov, ki se uporabljajo pri testih utrujanja materiala zaradi utripajočih obremenitev [63].

4 LABORATORIJSKO PREIZKUŠANJE LASTNOSTI IONSKIH TEKOČIN

Tudi potem, ko smo izluščili »najprimernejše kandidate« za uporabo kot hidravlično tekočino, delo z ionskimi tekočinami ni tako enolično določeno, kot pri drugih mazivih. Ionske tekočine zaradi svojih edinstvenih lastnosti pogosto zahtevajo specialno laboratorijsko opremo. Te zahteve smo izpolnili s širokim naborom analitičnih metod v podjetju Olma d.d., od katerih so mnoge primerne tudi za ionske tekočine, na primer meritve viskoznosti, gostote, korozije, titracija Karl Fischer, UV/VIS spektroskopija, FTIR spektroskopija, termogravimetrična analiza, meritve mazalnih lastnosti, lastnosti penjenja. Nekatere metode kot so meritev prebojne napetosti, sposobnosti filtracije, Stribeckove krivulje, kontaktnega kota pa smo opravili v drugih primernih laboratorijih.

V nadaljevanju so opisane metode, ki smo jih uporabili za določanje fizikalno kemijskih lastnosti ionskih tekočin in drugih hidravličnih tekočin, ki smo jih za namene primerjave v nekaterih primerih testirali vzporedno.

4.1 Običajne standardne meritve fizikalno kemijskih lastnosti ionskih tekočin

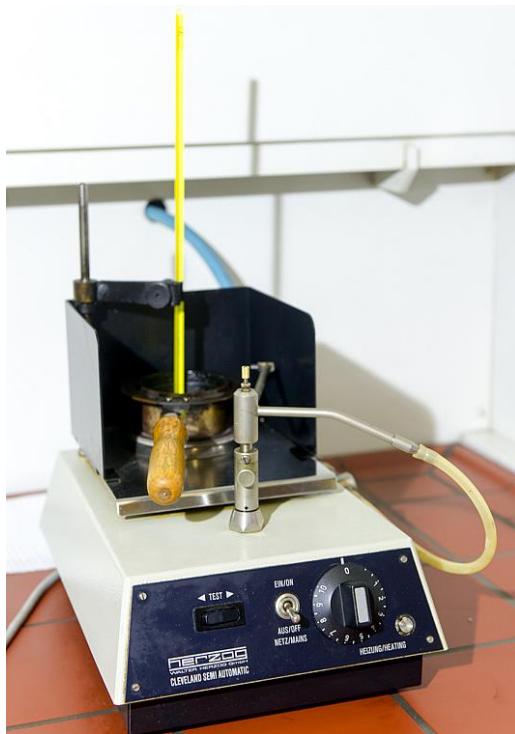
Povzeti opisi izvedbe posamezne meritve, velikosti potrebnega vzorca in uporabljeni opreme, se v glavnem nanašajo na običajna maziva in skladno z ustreznim standardom. Na te postopke, namenjene predvsem za testiranje npr. mineralnih olj (tekoča maziva), smo se oprli tudi pri testiranju ionskih tekočin (kot maziv) in so kot takšna služila za izhodišče. Ena od nalog v okviru disertacije je namreč tudi presoja primernosti uporabe obstoječih standardiziranih postopkov za primer testiranja ionskih tekočin kot maziv. Zaradi tega se v opisu merilnega postopka določene fizikalno kemijske lastnosti tudi pojavlja originalna beseda olje.

Opomba: Za splošno dikcijo teksta bi mogoče lahko uporabili tudi besedo vzorec ali mazivo, a kot rečeno, se opis nanaša na originalni zapis.

4.1.1 Določevanje plamenišča in točke gorenja v odprtih posodi; ASTM D 92

Plamenišče je najnižja temperatura, pri kateri se hlapi olja (v našem primeru ionske tekočine), ki ga segrevamo po določenem temperaturnem programu, ob stiku s plamenom

vžgejo. Točka gorenja je temperatura, pri kateri se s prehodom plamenčka čez vzorec hlapi olja vžgejo in gorijo najmanj 5 sekund. Za meritve smo uporabili Cleveland aparat, ki ga prikazuje slika 4.1.



Slika 4.1: Določevanje plamenišča v odprti posodi

Po odvzemu približno 100 g vzorca postopamo po naslednjem postopku:

- Posodo za določevanje plamenišča napolnimo z vzorcem točno do oznake. Termometer potopimo v vzorec do zareze, ter prižgemo plamen, ki naj bo dolg okoli 4 mm. Vzorec v začetku segrevamo s hitrostjo od 14 do 17 °C na minuto. Ko dosežemo temperaturo vzorca približno 56 °C pod pričakovano točko plamenišča, hitrost segrevanja zmanjšamo na 5 do 6 °C na minuto. Ko dosežemo temperaturo, ki je za 28 °C nižja od pričakovane temperature plamenišča, začnemo s prehodom plamenčka. Prehod naredimo vsakič, ko temperatura naraste za 2 °C. Plamen se pomika preko sredine posode pod pravim kotom na os termometra.
- Točko plamenišča odčitamo na termometru, kadar se pojavi plamen na kateremkoli delu vzorca. Ne smemo pa zamenjati prave točke plamenišča z roza svetlim vencem, ki včasih obkroža plamen.

- Za določevanje točke gorišča nadaljujemo s segrevanjem tako, da temperatura vzorca raste s hitrostjo 5 do 6 °C na minuto. Prehod plamenčka se nadaljuje v intervalih po 2 °C, dokler vzorec ne zagori in gori najmanj 5 sekund.

Temperaturo plamenišča in gorišča podajamo v °C in jo odčitamo na termometru. Kadar je zračni oz. atmosferski tlak različen od 101,3 kPa (760 mm Hg), upoštevamo korekcijo, ki jo izračunamo po enačbi (4.1) ali po enačbi (4.2).

$$\text{Korekcija} = C + 0,033(760 - P) \quad \text{Korekcija} = C + 0,33(760 - P) \quad (4.1)$$

$$\text{Korekcija} = C + 0,25(101,3 - K) \quad (4.2)$$

Korekcija [°C] – korecijska točka plamenišča

C [°C] – plamenišče

P [mm Hg] – atmosferski tlak

K [kPa] – atmosferski tlak

4.1.2 Določevanje plamenišča in točke gorenja v zaprti posodi; ASTM D 93

Plamenišče je najnižja temperatura, pri kateri se hlapi olja, ki ga segrevamo po določenem temperaturnem programu, ob stiku s plamenom vžgejo (slika 4.2).



Slika 4.2: Določevanje plamenišča v zaprti posodi

Za test potrebujemo približno 200 ml vzorca tekočine. Pri pripravi vzorca višje viskozne vzorce segrejemo, da postanejo dovolj tekoči. Vzorec lahko segrejemo največ do temperature, ki je za 18 °C nižja od pričakovane temperature plamenišča. V primeru, da vzorec vsebuje vodo, ga posušimo s kalcijevim kloridom ali pa ga prefiltriramo skozi vato oziroma kvalitetni filtrirni papir.

Za meritve smo uporabili Pensky-Martens aparat, ki ga prikazuje slika 4.2. Pri določanju plamenišča najprej opravimo predhodni poizkus po naslednjem postopku:

- Vzorec nalijemo v posodo do označene črte, pokrijemo in vse skupaj postavimo v aparat. Prižgemo oba plama, ki naj bosta dolga od 3,2 do 4,8 mm. Vključimo gretje in grejemo tako, da temperatura raste s hitrostjo 5 do 6 °C na minuto.
- Če pričakujemo točko plamenišča pod 110 °C, začnemo plamen primikati, ko dosežemo temperaturo vzorca 23 ± 5 °C pod pričakovano temperaturo plamenišča in ga primikamo pri vsakem dvigu temperature za 1 °C. Primikanje plama moramo izvesti v času 0,5 s. V spuščenem položaju držimo plamen 1 s, nato pa ga hitro vrnemo v prejšnji položaj. V času primikanja plama se mora mešanje izklopiti.
- Če pa pričakujemo točko plamenišča nad 110 °C, začnemo plamen primikati, ko dosežemo temperaturo vzorca 23 ± 5 °C pod pričakovano temperaturo plamenišča in ga primikamo na vsaki 2 °C.
- Pri neznani temperaturi plamenišča primikamo plamen na vsaki 2 °C.
- Točko plamenišča odčitamo na termometru, kadar se pri primikanju plama pojavi blisk.

Plamenišče s svežim testnim vzorcem nato določimo na naslednji način:

- S primikanjem plama pričnemo pri temperaturi, ki je za 23 ± 5 °C nižja od odčitane temperaturo plamenišča pri predhodnem poizkusu.
- Če je temperatura plamenišča za 28 °C višja ali pa za 18 °C nižja od odčitane temperaturo pri prvi določitvi, določitev ponovimo s svežim vzorcem.
- Točko plamenišča odčitamo na termometru, kadar se pri primikanju plama pojavi blisk.

Temperaturo plamenišča podajamo v °C in jo odčitamo na termometru. Kadar je atmosferski tlak različen od 101,3 kPa (760 mm Hg), upoštevamo korekcijo, ki jo izračunamo po enačbi (4.3) ali po enačbi (4.4).

$$\text{Korekcija} = C + 0,033(760 - P) \quad (4.3)$$

$$Korekcija = C + 0,25(101,3 - K) \quad (4.4)$$

<i>Korekcija</i>	[°C]	– korekcijska točka plamenišča
<i>C</i>	[°C]	– plamenišče
<i>P</i>	[mm Hg]	– atmosferski tlak
<i>K</i>	[kPa]	– atmosferski tlak

4.1.3 Določevanje gostote s pomočjo meritnika gostote; ISO 12185

Gostota homogene snovi je razmerje med njenou maso in volumnom. Odvisna je od temperature. Standardna temperatura merjenja, oziroma referenčna temperatura je 15 °C ali 20 °C.

Majhno količino (vsaj 1 ml) testnega vzorca vnesemo v vzorčno celico. Ob znani oscilacijski frekvenci dobimo gostoto testnega vzorca tako, da upoštevamo konstanto celice, ki smo jo že določili z merjenjem oscilacijske frekvence, ko je celica napolnjena s standardno tekočino znane gostote.

Meritve gostote smo izvedli z instrumentom Mettler Toledo Density meter DE 40 (slika 4.3). Pri tem smo uporabili naslednje reagente:

- izpiralne tekočine - voda, alkohol, eter,
- standardno tekočino - water ME-51338002.

Posebno moramo biti pazljivi pri vzorčenju hlapljivih snovi, da preprečimo vsako izgubo hitro hlapljivih sestavin v vzorcu. Vzorec mora biti odvzet, transportiran in shranjen v isti posodi.

Shranjevanje hlapljivih tekočin z avtomatsko tehniko ni priporočljivo, razen če ne uporabimo variabilnega volumskega vzorčevalca za odvzem in transport vzorca v laboratoriju. Uporaba fiksne volumske posode nam lahko da rezultate z rahlo izgubo materiala za vzorčenje in zato neposredno vpliva na meritev.

Kadar odvzemamo vzorec z uporabo variabilnega volumskega vzorčevalnika, moramo zapisati temperaturo in tlak vzorčenja.

Nujno je, da je količina vzorca, ki ga bomo testirali, reprezentativna in včasih je potrebno mešati vzorce, da zagotovimo homogenizacijo, ki je nujna za podvzorčenje.



Slika 4.3: Aparat za določanje gostote Mettler Toledo DE 40

Pri pripravi vzorca postopamo tako da:

- so izgube lahko hlapnih sestavin kar najbolj zmanjšane,
- temperatura vzorca ni pod kapljiščem,
- temperatura vzorca ni pod temperaturo, kjer se pojavi vosek (WAT), kadar določamo v skladu z IP 389/93,
- temperatura vzorca ni 20°C nad kapljiščem, kadar določamo skladno z ISO 3016.

V primeru določanja gostote olja, brez vsebnosti vode in/ali usedlin, le tega mešamo z nežnim stresanjem. Vzorce surovih olj ali naftnih produktov, ki vsebujejo vodo in/ali usedlino, mešamo v originalni posodi in pri tem upoštevamo vsa navodila, da zmanjšamo izgube lahko hlapnih sestavin. Vzorce voskastega surovega petroleja pred mešanjem v originalni embalaži segrejemo za 3°C nad WAT ali 20°C nad kapljišče surovega petroleja in pri tem pazimo, da zmanjšamo izgube lahko hlapnih sestavin. Vzorce voskastih destilatov segrejemo za 3°C nad točko motnišča in potem zmešamo. Vzorce kurih olj pred mešanjem segrejemo.

Gostota vzorca naj bi se merila, kadarkoli je to možno, pri referenčni temperaturi. Če to ni možno, izberemo temperaturo, ki je 3°C nad motniščem ali WAT-om ali pa 20°C nad kapljiščem in pod temperaturo, pri kateri se pojavijo plini iz vzorca.

Celico očistimo in posušimo z uporabo topila za izpiranje in po potrebi z vodo, ki ji sledi vodotopno topilo. Posušimo do suhega s čistim zrakom.

Instrument naj bo umerjen, ko je prvič instaliran in po vsaki spremembi testne temperature ali po vsakem popravilu aparata. Umeritev merilnika gostote naj bo potrjena največ 7 dni pred nadaljnjo uporabo. Zabeležimo odčitek gostote ali frekvenco nihanja za primer čiste celice, napolnjene z zrakom iz okolice. Nato vstavimo umeritveno tekočino v celico in jo termostatiramo. Zabeležimo frekvenco nihanja ali gostoto in temperaturo celice. Celico očistimo in posušimo v skladu z navodili. Konstanto celice izračunamo skladno z navodili proizvajalca.

Na merilniku gostote odčitamo vrednost, ko je celica napolnjena z okoliškim zrakom, na ± 1 glede na zadnjo pomembno decimalno številko v primerjavi z referenčno, shranjeno med kalibracijo. Če se številke ne ujamejo, celico očistimo in ponovimo test. Če se odčitek še vedno razlikuje, ponovno umerimo merilnik gostote. Celico napolnimo z vzorcem, na način naveden v navodilih, postopek meritve pa izvajamo v skladu z navodili proizvajalca.

Testno poročilo naj vsebuje naslednje informacije:

- referenco tega mednarodnega standarda (ISO 12185:1996),
- tip in identifikacijo produkta v testu,
- opis vzorčenja,
- testno temperaturo,
- rezultate,
- kakršnekoli razlike, po dogovoru ali po postopku,
- datum testa.

4.1.4 Določevanje kinematične viskoznosti pri 40 °C in 100 °C; ASTM D 445

Najpomembnejša fizikalna lastnost mazalnih in hidravličnih tekočin je viskoznost. To je merilo za upor tekočine pod delajočim tlakom proti tečenju, njena vrednost je podana z razmerjem med delajočo strižno napetostjo in gradientom strižne hitrosti. Viskoznost je bistvena lastnost mazalnega olja, ker vpliva na njegovo sposobnost, da ustvari mazalni film ali zmanjša trenje in obrabo. Odvisna je od temperature, tlaka in strižne hitrosti. Z naraščanjem temperature viskoznost pada, olje postaja vse bolj tekoče. Za merjenje viskoznosti uporabljamo viskozimetre. S kapilarnimi viskozimetri, iz katerih olje izteka le zaradi lastne težnosti, določamo kinematično viskoznost. Kinematična viskoznost je merilo za upor tekočine pod vplivom težnosti proti tečenju. Definirana je kot razmerje med dinamično viskoznostjo in gostoto tekočine. Enota je mm^2/s . Pri kontroli kakovosti mazalnih olj navadno

merimo kinematično viskoznost, ker je meritev enostavna, hitra in natančna. Standardni temperaturi merjenja sta 40 °C in 100 °C. Podatka za kinematično viskoznost pri obeh temperaturah sta tudi osnova za določanje indeksa viskoznosti.

Za določevanje kinematične viskoznosti smo uporabljali naslednjo opremo:

- Cannon-Fenske viskozimetre,
- stojalo za viskozimeter,
- kopel za 40 °C,
- kopel za 100 °C,
- štoparica.

Za meritev viskoznosti potrebujemo približno 100 ml vzorca. Del svežega ali rabljenega vzorca prefiltriramo skozi filtrirni lonček (npr. oznake G4), da bi odstranili morebitne prisotne nečistoče v vzorcu.

Eno kopel segrejemo na 40 °C, drugo na 100 °C. Glede na pričakovano viskoznost vzorca izberemo tip viskozimetra. Pretočni čas mora biti večji od 200 sekund oz. večji od najmanjšega dovoljenega časa za to velikost (preglednica 4.1).

Preglednica 4.1: Merilno območje posameznih viskozimetrov

Tip viskozimetra	Viskoznost (mm ² /s)
75	1,6 do 6,4
100	3 do 12
150	7 do 28
200	20 do 80
300	50 do 200
350	100 do 400
400	240 do 960
450	500 do 2000

Viskozimetru odčitamo konstanto in si jo zabeležimo. Nato olje s pomočjo vakuumsko črpalko posesamo v viskozimeter. Za termostatiranje vzorca v viskozimetru pri 40 °C potrebujemo 10 minut. Za termostatiranje vzorca v viskozimetru pri 100 °C potrebujemo 15 minut. Nato z vakuumsko črpalko posesamo olje v zgornjo bučko Cannon-Fenske viskozimetra in merimo s štoparico pretočni čas t od oznake do oznake. Pretočni čas merimo v sekundah, z natančnostjo 0,1 sekunde. Za vsako določitev so potrebne 2 do 3 meritve,

oziroma ponavljamo meritve, dokler razlika dveh izmerjenih časov ni manjša od 0,2 %. Srednja vrednost meritev se uporablja za izračun kinematične viskoznosti.

Kinematično viskozno izračunamo po enačbi (4.5).

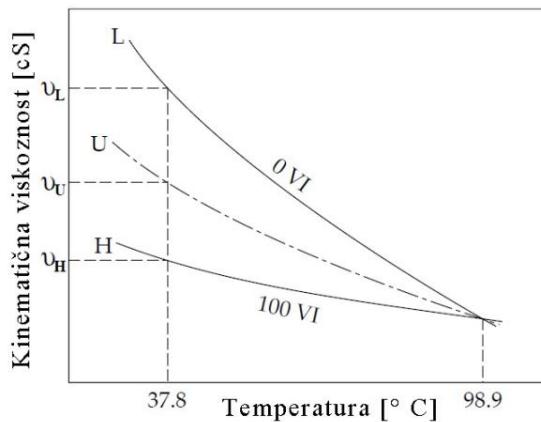
$$\nu = K \cdot t \quad (4.5)$$

- ν [mm²/s] – kinematična viskozna
 K [mm²/s²] – konstanta viskozimetra
 t [s] – povprečna vrednost meritve časa

4.1.5 Določevanje indeksa viskoznosti

Indeks viskoznosti je merilo za stabilnost viskoznosti pri temperaturnih spremembah olja. Visok indeks viskoznosti pomeni, da ima olje boljšo viskozno stabilnost pri temperaturnih spremembah.

Slika 4.4 prikazuje, da imajo različna olja različen naklon premice na ASTM diagramu. Že leta 1920 je bilo znano, da so bila pennsylvanska bazna olja boljša od teksaških. Pennsylvanska bazna olja so imela najboljše viskozno-temperaturne karakteristike, medtem ko so teksaška imela najslabše, saj je njihova viskozna močno variirala s temperaturo [64].



Slika 4.4: Določanje indeksa viskoznosti [64]

Z vidika tehnike se je pojavila potreba po parametru, ki bi za določeno olje natančno opisoval odvisnost viskoznosti od temperature. Leta 1929 je bil vpeljan indeks viskoznosti. Slednji je povsem empirični parameter, ki primerja določeno vrsto olja z dvema referenčnima oljema, katerih viskozna se zelo različno spreminja s temperaturo. Referenčni olji sta bili izbrani tako, da ima eno od njiju indeks viskoznosti enak 0, drugo pa indeks viskoznosti enak

100 pri temperaturi 100 °F (37,8 °C), vendar imata pri temperaturi 210 °F (98,89 °C) enako viskoznost kot olje, kateremu določamo indeks viskoznosti, kot prikazuje slika 4.4.

Ker sta pennsylvansko in teksaško olje imeli enako viskoznost pri 210 °F (98,9 °C), sta bili sprva izbrani kot referenčni olji. Baznemu olju iz Pennsylvanije je bil dodeljen indeks viskoznosti 100, medtem ko je bil teksaškemu baznemu olju dodeljen indeks viskoznosti 0. Indeks viskoznosti lahko izračunamo z enačbo (4.6).

$$VI = \frac{(L - U)}{(L - H)} \cdot 100 \quad (4.6)$$

Kinematično viskoznost opazovanega olja najprej izmerimo pri temperaturi 40 °C (parameter U) in 100 °C. Nato iz tabele ASTM D2270 določimo parametra L in H glede na viskoznost opazovanega olja pri 100 °C. Ko podatke vstavimo v zgornjo enačbo, nam ta poda indeks viskoznosti opazovanega olja.

Indeks viskoznosti večine rafiniranih mineralnih olj na tržišču je približno 100, medtem ko imajo multigradna in sintetična olja višji indeks viskoznosti, približno 150. Indeksi viskoznosti ionskih tekočin so v splošnem višji kot pri mineralnih oljih.

4.1.6 Določevanje korozije v vlažni komori; DIN EN ISO 6270-2

Namen testa je kontrola korozijske obstojnosti nezaščitenih kovin ali zaščitenih s kovinsko ali nekovinsko prevleko v atmosferi vlažne vodne pare.

Vlažna komora je zaprta posoda, pri kateri je dno pokrito z destilirano vodo, ki jo segrevamo. Tako je relativna vlažnost v komori vedno 100 %. Testi se pogosto delajo s prekinitvami. Preglednica 4.2 prikazuje posamezne okoliščine preskušanja, kakor je določeno s tem standardom.

Preiskave v korozijskih komorah so zelo primerne za primerjavo materialov, in sicer tistih z že znano korozijsko odpornostjo in tistih, ki jih preskušamo.

Pri testih v vlažni komori uporabljamo naslednje aparate in pribor:

- vlažna komora HK 400,
- pločevinasta ploščica – material ploščic: ST 1405 (po DIN 1623 del 1):
 - debelina 0,7 do 0,8 mm,
 - Ra = 0,6 do 1,9 µm,
 - velikost 150 mm x 210 mm.

- smirkov papir zrnatosti 120,
- destilirana voda,
- aceton,
- etanol.

Preglednica 4.2: Vrste atmosfere pri testih korozije v vlažni komori

Atmosfera vlažne vodne pare	Oznaka okoliščin preskušanja	Čas trajanja ciklusa (h)	Čas trajanja faz (h)	Temperatura v komori (°C)	Relativna vlažnost zraka (%)
Konstantna	K	-	-	40 ± 3	100
Spremenljiva	A1	24	8 (od začetka segrevanja)	40 ± 3	100
			16 (od začetka hlajenja, preskusna naprava odprta)	18 do 28	< 100
Spremenljiva	A2	24	8 (od začetka segrevanja)	40 ± 3	100
			16 (od začetka hlajenja, preskusna naprava zaprta)	18 do 28	100

Vlažna komora mora biti postavljena v prostoru brez agresivne atmosfere, s sobno temperaturo in relativno vlažnostjo zraka največ 75 %. Stati mora na takem mestu, da je zaščitena pred prepihom in neposrednimi sončnimi žarki.

Dno vlažne komore napolnimo z destilirano vodo do višine 10 mm do 12 mm. Višino vode preverjamo vsakokrat pred začetkom segrevanja. Pločevinaste ploščice naj bodo postavljene v preskusni prostor po možnosti v isti višini. Če je treba vzorce postaviti drugega nad drugim, jih razpostavimo tako, da kondenzirana voda z zgornjih vzorcev in vodoravnih nosilcev ne pada na spodnje. Vzorci (pločevinaste ploščice) morajo biti v preskusnem prostoru razpostavljeni tako, da bo:

- oddaljenost vzorcev od sten naprave najmanj 100 mm,
- razdalja med spodnjim robom vzorca in vodno površino 400 mm do 450 mm,
- razmik med vzorci najmanj 20 mm.

Istočasno lahko preskušamo samo takšne vzorce, ki na kakršenkoli način medsebojno ne morejo vplivati.

Pred nanašanjem zaščitnega sredstva na pločevinasto ploščico, moramo le-to očistiti do kovinskega sijaja s smirkovim papirjem ter jo razmasti najprej z acetonom in nato še z etanolom. Spolirano, razmaščeno in suho pločevinasto ploščico na tanko namažemo s čistim mehkim čopičem z zaščitnim sredstvom, ki mora očiščeno površino popolnoma prekriti, in jo vstavimo v vlažno komoro. Ko so vzorci vloženi v preskusni prostor in vrata vlažne komore zaprta, vključimo gretje. Potrebno temperaturo $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ je treba doseči v obdobju 90 minut, pri čemer se mora na vzorcih tvoriti kondenzirana voda.

Pri preskušanju v konstantni atmosferi (K) je zahtevano vzdrževanje konstantne temperature ($40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$) ves čas preskušanja. Preskušanje se izvaja s toliko ciklusi, da opazimo nastanek prvih vidnih znakov korozije - rjavi madeži (1 ciklus = 24 ur). Pri preskušanju v spremenljivi atmosferi (A1) po 8 urah, računano od vključitve gretja, prekinemo ogrevanje, vrata vlažne komore odpremo in jih pustimo 16 ur odprta. S tem je končan prvi ciklus. Nato kontroliramo nivo destilirane vode, jo po potrebi dolijemo ter zapremo napravo. Z vključitvijo gretja začnemo nov ciklus. Preskušanje se izvaja s toliko ciklusi, da opazimo nastanek prvih vidnih znakov korozije (1 ciklus = 24 ur). Pri preskušanju v spremenljivi atmosferi (A2) po 8 urah, računano od vključitve gretja, prekinemo ogrevanje, preskusna naprava pa ostane zaprta še 16 ur. Tako ostane kondenzirana voda na vzorcih ves čas preskušanja. S tem je končan prvi ciklus. Kontroliramo nivo destilirane vode v komori, po potrebi jo dolijemo in vključimo gretje. S tem se začne nov ciklus. Preskušanje se izvaja s toliko ciklusi, da opazimo nastanek prvih vidnih znakov korozije (1 ciklus = 24 ur). V vseh treh primerih opazujemo spremembe na površini pločevine.

V poročilo o rezultatih testiranja navedemo:

- opis preskusnih vzorcev in morebitne predhodne obdelave,
- okoliščine preskušanja (atmosfera K, A1 ali A2),
- število ciklusov ali trajanje preskušanja.

4.1.7 Določevanje korozivnosti na baker; ASTM D130

Ta metoda predpisuje določevanje korozivnosti na baker (Cu). Polirano bakreno ploščico potopimo v vzorec pri predpisani temperaturi in predpisanem času. Korozivnost izražamo z vrednostmi 1 do 4, ki jih dobimo s primerjanjem korodirane bakrene ploščice s sveže polirano standardno ploščico, ocenjujoč videz testne ploščice kot prikazuje slika 4.5 (ASTM Copper Strip Corrosion Standards). Za izvedbo testa potrebujemo naslednjo opremo:

- vodna kopel,

- thermometer,
- epruveta,
- sredstvo za poliranje: brusni papir s silicijevim karbidom različnih stopenj grobosti,
- bombažna vata,
- bakrena ploščica gladke površine iz elektrolitičnega bakra, čistosti > 99,9 %, z dimenzijami:
 - dolžina 75 mm,
 - širina 12,5 mm,
 - debelina 1,5 do 3,0 mm.
- korozijski standardi.



Slika 4.5: Etalon za določevanje korozivnosti na baker

Za test potrebujemo 50 ml vzorca. Bakreno ploščico spoliramo najprej z grobim in nato s finim brusnim papirjem. Spolirano ploščico očistimo z vato. V epruveto nalijemo vzorec in vanj potopimo sveže polirano in očiščeno bakreno ploščico. Epruveto postavimo v koplji pri predpisani temperaturi 50 °C ali 100 °C in predpisanim času segrevanja (običajno 3 h). Po treh urah prenehamo s segrevanjem, ploščico vzamemo iz epruvete in ocenimo korozivnost s standardnimi bakrenimi ploščicami (etaloni), ki jih prikazuje slika 4.5. Testno ploščico in etalon postavimo tako, da pada svetloba pod kotom približno 45 °C.

Rezultate podajamo kot korozivnost na Cu z oznako stopnje korozije, ki jo določimo iz tabele ali s primerjavo z etalonom na sliki ob navedbi temperature in časa trajanja poskusa.

Primer: če vzorec testiramo pri 100 °C, ga segrevamo 3 ure in določimo stopnjo korozije 4c, potem rezultat zapišemo:

Korozija na baker (3h / 100 °C): 4c

4.1.8 Določevanje deemulgirnih lastnosti; ASTM D 1401

S to metodo določamo pri oljih in sintetičnih tekočinah sposobnost ločevanja vode po emulgiraju pod določenimi pogoji. Pri preskušanju sposobnosti izločanja vode zmešamo določeni količini olja in vode pri predpisani temperaturi, da nastane emulzija. Nato merimo čas, v katerem se emulzija razsloji in se voda izloči iz olja.

Za vzorce z viskoznostjo od 28,8 mm²/s do 90 mm²/s pri 40 °C poskus izvajamo pri temperaturi 54 °C ± 1 °C, za vzorce z viskoznostjo nad 90 mm²/s pri 40 °C pa poskus izvajamo pri temperaturi 82 °C ± 1 °C.

Pri sintetičnih tekočinah, ki imajo gostoto večjo od gostote vode (=1 g/cm³), ostaja postopek enak, vendar je treba upoštevati, da voda v tem slučaju verjetno splava na emulzijo ali sintetično tekočino.

Za delo potrebujemo naslednjo opremo:

- 100 ml merilni valj z razdelitvijo skale od 5 do 100 ml z natančnostjo 1 ml,
- vodna kopel,
- univerzalni laboratorijski mešalnik Tehntica UM-405,
- mešalo iz nerjavnega jekla,
- mešalno ploščico dimenzije (mm):
 - dolžina: 120 ± 1,5
 - širina: 19 ± 0,5
 - debelina: 1,5
- mešalno palico dimenzije (mm):
 - premer: 6,0
 - dolžina: 200 ± 20
- štoparico,
- destilirano vodo,
- krom-žveplovo kislino za čiščenje merilnega valja.

Za test potrebujemo 100 g vzorca. Kopel segrejemo na temperaturo, ki jo zahteva viskoznost preiskovanega vzorca. Ko dosežemo želeno temperaturo, vzdržujemo to temperaturo na ±1 °C natančno. V merilni valj nalijemo 40 ml destilirane vode in toliko

vzorca, da zgornji nivo olja ne preseže oznake 80 ml. Upoštevati moramo širjenje volumna pri višji temperaturi. To širjenje je lahko dva do tri mililitre pri 82 °C. Merilni valj vstavimo v ogrevano kopel in ogrevamo, dokler ne dosežemo temperature kopeli, to je približno deset minut. Merilni valj pritrdimo in v raztopino potopimo mešalo do predpisane globine (6 mm nad dnom merilnega valja). Vzorec mešamo z univerzalnim mešalnikom 5 minut pri (1500 ± 15) obratov/min.

Čas merimo s štoparico. Po pretečenem času zaustavimo mešanje in dvignemo sistem za mešanje nad merilni valj, tako da stečejo kapljice vzorca, ki so eventualno ostale na mešalu, nazaj v merilni valj. Osvobodimo merilni valj in ga pazljivo premestimo na drugo mesto v kopeli. V 5 minutnih intervalih vzamemo merilni valj iz kopeli in si zapišemo spremembe. Pri temperaturi testa 54 °C prenehamo odčitavati spremembe po 30 minutah, pri 82 °C pa po 60 minutah.

Rezultat zapišemo v obliki 40-40-0 (20) = olje-voda-emulzija (čas v min.), zaradi enotnosti ga lahko podamo, kot je napisano v spodnjih primerih:

- 40-40-0 (20) Popolna ločitev je nastopila v 20 minutah. Po 15 minutah je ostalo več kot 3 ml emulzije.
- 39-38-3 (20) Popolna ločitev ni nastopila, toda količina emulzije se je zmanjšala na 3 ml, zato je bil test končan.
- 39-35-6 (60) Po 60 minutah je ostalo več kot 3 ml emulzije – 39 ml olja, 35 ml vode in 6 ml emulzije.
- 41-37-2 (20) Popolna ločitev ni nastopila, toda količina emulzije se je po 20 minutah zmanjšala na 3 ml ali manj.
- 43-37-0 (30) Sloj emulzije po 30 minutah se je zmanjšal na 3 ml ali manj. Sloj emulzije po 25 minutah je presegal 3 ml, na primer 0-36-44 ali 43-33-4.

4.1.9 Določevanje penjenja v mazalnih oljih; ASTM D 892

V vzorec 5 minut pri temperaturi 24 °C vpihavamo zrak s konstantno hitrostjo, nato vzorec miruje 10 minut. Volumen pen merimo na koncu vpihanja zraka in po 10 minutah mirovanja. Test ponovimo z drugim vzorcem, ki je segret na 93,5 °C in potem po popolni pogasitvi pene ponovno pri temperaturi 24 °C.

Oprema za določevanje penjenja obsega:

- 1000 ml testni valj z oznakami (graduiran) in z zamaškom in cevjo za dovod zraka, na kateri je na spodnjem delu pritrjen okrogli razpršilnik zraka premera 25,4 mm, izdelan

iz zlepiljenih zrnč aluminijevega oksida ali pa cilindrični kovinski razpršilnik, izdelan iz sintranega 5-mikrometrskega, poroznega, nerjavečega jekla. Testni cilinder mora biti takšnega premera, da bo razdalja od dna cilindra do oznake 1000 ml, znašala (360 ± 25) mm. Cev za dovod zraka v testni cilinder vstavimo tako, da se razpršilnik zraka skorajda dotika dna valja in se nahaja v sredini testnega valja. Razpršilnik mora izpolnjevati naslednje pogoje: največji premer pore ne sme biti večji od $80 \mu\text{m}$; prepustnost pri tlaku $2,45 \text{ kPa}$ ($250 \text{ mm vodnega stolpca}$) pa znaša med $(3000 \text{ in } 6000)$ ml zraka/minuto.

- prozorna kopel za termostatiranje iz borosilikatnega stekla s 4 testnimi mesti z digitalnim termostatom, mora biti dovolj velika, da vanjo vstavimo testni valj najmanj do oznake 900 ml in da lahko vzdržujemo konstantni temperaturi $24^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ oz. $93,5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$. Kopel mora biti čista in tekočina v njej dovolj bistra, da jasno vidimo oznake na testnem valju kot prozorna kopel je lahko cilindrična posoda iz stekla, ki je odporno na višje temperature, premera približno 300 mm in višine 450 mm).
- mini kompresor in vakuumska črpalka s priključno cevjo dolžine 1 m za vpihanje zraka. Pretok zraka reguliramo na $94 \pm 5 \text{ ml/min}$. Za merjenje pretoka zraka je uporabljen meritnik pretoka s cevjo dolžine 1 m. Skupni volumen zraka, ki izhaja iz aparata za določanje penjenja, moramo meriti s pripravo, ki je sposobna natančno meriti volumen zraka okoli vrednosti 470 ml. Pri izhodu, pred merjenjem mora zrak vsaj čez en zavoj bakrene cevi, ki se nahaja v kopeli s temperaturo 24°C . Tako omogočimo, da je temperatura zraka približno 24°C . Merilna naprava mora biti zračno nepropustno povezana, da ne pride do uhajanja zraka.
- termometer ASTM D 12C/IP 64 C (od -20°C do $+102^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$)
- štoparica z natančnostjo merjenja 1 sekunde ali manj.

Za test potrebujemo okoli 500 ml vzorca olja. Postopek določevanja penjenja poteka v treh sekvenkah:

- Sekvenca I: Brez mehaničnega tresenja ali mešanja prelijemo približno 200 ml vzorca za analizo v čašo, ga segrejemo na temperaturo $49^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ in nato ohladimo na $24^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$. Vzorec za analizo prelijemo v 1000 ml testni valj do oznake 190 ml. Testni valj postavimo v kopel najmanj do oznake 900 ml, pri čemer vzdržujemo temperaturo kopeli na $24 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Ko se temperatura vzorca v valju izenači s temperaturo v kopeli, postavimo razpršilnik na cevi za dovod zraka v valj, pri čemer je

dovod zraka izklopljen ter počakamo okoli 5 minut, da se razpršilnik prepoji z vzorcem. Po 5 minutah priključimo cev za dovod zraka na aparat za merjenje pretoka zraka in vklopimo dovod zraka. Pretok zraka nastavimo na (94 ± 5) ml/min, tako čist in suh zrak čez razpršilnik prodira v vzorec 5 minut ± 3 s, merjeno od trenutka pojava prvih zračnih mehurčkov na površini razpršilnika. Po preteku tega časa dovod zraka izključimo s snetjem cevi z merilnika pretoka in takoj zabeležimo volumen pene. Celoten volumen zraka, ki je prešel sistem mora znašati $470 \text{ ml} \pm 25 \text{ ml}$. Valj z vzorcem pustimo mirovati 10 minut ± 10 s nakar ponovno zabeležimo volumen pene.



Slika 4.6: Aparatura za izvajanje testa penjenja

- Sekvenca II: Drugi del vzorca nalijemo v čisti 1000 ml valj do oznake 180 ml. Valj potopimo v kopel segreto na $93,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, najmanj do oznake 900 ml. Ko vzorec doseže temperaturo $93,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, postavimo cev za dovod zraka in razpršilnik v valj in postopamo dalje po postopku, opisanem pri sekvenci I. Volumen pene zabeležimo takoj po prenehanju vpihanja zraka in po ustalitvi pene.
- Sekvenca III: Z mešanjem razbijemo peno, ki je ostala po testu na $93,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzorec ohladimo na temperaturo $43,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tako da valj prenesemo iz kopeli na sobno temperaturo. Po ohladitvi postavimo valj nazaj v kopel, kjer je temperatura $24 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ko se temperatura vzorca izenači s temperaturo v kopeli, v vzorec vstavimo očiščeno cev za dovod zraka z razpršilnikom in ponovimo postopek opisan

pri sekvenci I. Zabeležimo višino pene po vpihanjanju zraka in po umiritvi pene. Način podajanja rezultatov testa penjenja prikazuje preglednica 4.3.

Preglednica 4.3: Način podajanja rezultatov testa penjenja po ASTM D 892

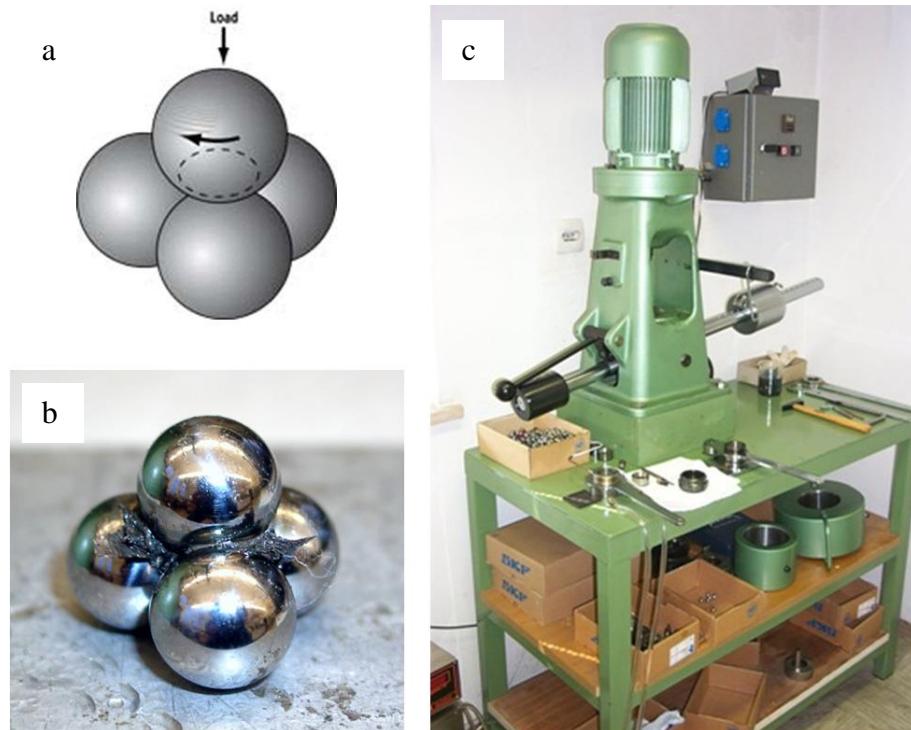
	Potek penjenja ASTM D 892 Volumen pene po 5 min vpihanjanju zraka (ml)	Stabilnost pene ASTM D 892 Volumen pene po 5 min mirovanju vzorca (ml)
Sekvenca I	Izmerjena vrednost	Izmerjena vrednost
Sekvenca II	Izmerjena vrednost	Izmerjena vrednost
Sekvenca III	Izmerjena vrednost	Izmerjena vrednost

Teste penjenja smo izvajali po standardiziranem postopku ASTM D 892 s standardizirano opremo proizvajalca Petrotest (slika 4.6).

4.1.10 Določevanje točke zavaritve in premera obrabne kalote; IP 239-85

Mazalne lastnosti hidravličnih tekočin lahko merimo z določevanjem točke zavaritve in obrabnim testom po standardiziranem postopku (npr. IP 239-85). Metoda temelji na obremenjevanju štirih standardiziranih jeklenih kroglic premera 12,7 mm. Zgornja rotirajoča kroglica drsi po spodnjih treh fiksnih kroglicah pri konstanti obremenitvi in s konstantno hitrostjo vrtenja 1440 min^{-1} (slika 4.7, levo). Na istem aparatu lahko opravljamo meritve točke zavaritve in obrabni test mazalnim oljem, emulzijam in mastem.

Točko zavaritve merimo pri določeni obremenitvi oz. pritisku zgornje kroglice v času 10 sekund. Zgornja jeklena kroglica rotira in s testno obremenitvijo pritiska ob spodnje tri nepremične kroglice, ki so potopljene v tekočino, ki jo testiramo. Rezultat meritve podajamo v kg in ga predstavlja dve števili (npr. 140/160). Prvo število podaja največjo obremenitev pri kateri v času testa (10 s) ni prišlo do zavaritve kroglic. Drugo število podaja najmanjšo obremenitev pri kateri je v času testa prišlo do popolne zavaritve jeklenih kroglic, oziroma avtomatske izključitve naprave.



Slika 4.7: a), b) Princip meritve točke zavaritve, c) štiri-krogelni aparat Hansa Press

Obrabni test poteka mnogo dlje, in sicer $60 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$, pri konstanti temperaturi in obremenitvi, ki pa sta odvisni od testirane hidravlične tekočine. Obraba kroglice je odvisna od obremenitve, hitrosti, časa trajanja poskusa in od lastnosti maziva, ki ga testiramo. Ker so vsi parametri, razen lastnosti maziva, konstantni, je rezultat oz. obraba kroglic odvisna le od mazalnih lastnosti testirane tekočine. Po končanem poskusu rezultat obrabnega testa dobimo s pomočjo meritve obrabe spodnjih treh jeklenih kroglic pod mikroskopom, kjer izmerimo premere obrabnih kotanj na treh nepremičnih kroglicah. Velikost obrabe je definirana kot srednji premer obrabe kroglic v znanih pogojih.

Analizi (določevanje točke zavaritve in obrabni test) smo izvajali po standardiziranem postopku IP 239 s štiri-krogelnim aparatom Hansa Press, ki ga prikazuje slika 4.7 (desno).

4.1.11 Določevanje točke tečenja; ASTM D 97

Točka tečenja je najnižja temperatura, pri kateri tekočina, ki jo ohlajamo pod določenimi pogoji, še steče. Izražamo jo kot temperaturo, ki je za $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ višja od temperature, pri kateri tekočina v preskusni epruveti ne steče več, ko epruveto dvignemo iz hladilne komore in držimo vodoravno 5 sekund. Točka tečenja nam pove, do kako nizke temperature tekočino lahko pretakamo ali prečrpavamo. Za ocenjevanje uporabnosti mazalnih olj pri

nizkih temperaturah pa ni primeren kriterij. Za določevanje točke tečenja uporabljamo naslednjo opremo:

- kopel za nizke temperature,
- epruveta za določevanje točke tečenja.

Vzorec, ki ga testiramo, segrejemo do temperature, ki je najmanj 14 °C nad pričakovano točko tečenja. Vzorec nalijemo v epruveto do oznake in vstavimo epruveto v kopel za nizke temperature. Vsakih 5 minut znižamo temperaturo kopeli za 3 °C in opazujemo tečenje vzorca tako, da epruveto dvignemo iz hladilne komore in jo držimo vodoravno 5 sekund. Ko vzorec v preskusni epruveti ne steče več, temperaturo zabeležimo.

Rezultat za točko tečenja dobimo tako, da odčitano temperaturo na termometru zmanjšamo za 3 °C. Rezultat podamo v celih °C.

V našem primeru smo meritve točke tečenja izvajali po standardiziranem postopku ASTM D 97 s kriostatom Haake KT 50 L.

Do sedaj opisane metode uporabljamo kot standardne metode za ugotavljanje fizikalno kemijskih lastnosti predvsem različnih mazalnih olj oz. tekočih maziv (tudi hidravličnih tekočin), in kot že omenjeno na začetku tega poglavja, predstavljajo uporabljeni metodi izhodišče za testiranje lastnosti ionskih tekočin. Poleg omenjenih in uporabljenih standardnih testov, so bile za testiranje tako ionskih tekočin, kot primerjalnih hidravličnih tekočin uporabljeni tudi specialne, namenske meritve fizikalno kemijskih lastnosti. Te bodo predstavljene v nadaljevanju. Te namenske teste smo izvajali z namenom, da bolje oz. širše spoznamo tudi ostale pomembne lastnosti ionskih tekočin in jih primerjamo z običajnimi mazivi. Na podlagi rezultatov tovrstnih meritev bomo pridobili številne koristne informacije in napotke oz. smernice za gradnjo sestavin, primernih za uporabo z ionskimi tekočinami oz. sistemi, ki imajo vgrajene te tekočine.

4.2 Posebne meritve fizikalno kemijskih lastnosti ionskih tekočin

Poleg običajnih meritev fizikalno kemijskih lastnosti ionskih tekočin, opravljenih po standardnih testnih metodah, ki so opisane v točki 4.1, nekateri rezultati pa predstavljeni v točki 4.3, smo opravili tudi nekaj posebnih, dodatnih meritev. Tudi v tem primeru smo nekatere meritve opravili po standardnih, a manj običajnih testnih metodah, nekatere pa po prilagojenih metodah. Glavni namen teh meritev je bila ugotovitev primernosti za uporabo v

realnem hidravličnem sistemu. Rezultati teh meritev so nam omogočili podajanje ustreznih smernic za izbiro hidravličnega sistema in njegovih sestavnih delov.

4.2.1 Sposobnost filtracije; ISO 13357

Ker tekočina v hidravličnem sistemu deluje kot mazivo, ki zmanjšuje obrabo hidravličnih elementov, je pomembno zniževanje koncentracije trdih delcev v obtoku. To še zlasti velja v primeru majhnih zračnosti v hidravličnem sistemu, saj je tedaj za nemoteno delovanje in doseganje pričakovane uporabne dobe sestavnih delov zahtevana visoka stopnja čistosti tekočine. Odstranjevanje kontaminantov opravljajo filtri. Sposobnost tečenja hidravlične tekočine skozi fine filrske elemente brez njihovega mašenja imenujemo filtrabilnost ali sposobnost filtracije. Sposobnost filtracije mineralnih olj ocenujemo z laboratorijsko testno metodo po standardu ISO 13357. Prvi del tega standarda zajema testiranje ob prisotnosti vode v olju, drugi del pa brez nje. Za ostale tekočine test načeloma ni uporaben, ker testne filrske membrane z njimi morda niso združljive.

Test izvajamo trikrat. Vzorce za test ob prisotnosti vode pripravimo po naslednjem postopku:

- Laboratorijski vzorec premešamo, tako da embalažo v $60\text{ s} \pm 10\text{ s}$ močno 30-krat obrnemo.
- Z merilnim valjem prenesemo $330\text{ ml} \pm 5\text{ ml}$ vzorca v 500 ml laboratorijsko posodo z zamaškom.
- Z merilno pipeto vzorcu dodamo $66\text{ ml} \pm 0,02\text{ ml}$ vode stopnje 3 po ISO 3696.
- Laboratorijsko posodo damo za $2\text{ uri} \pm 5\text{ min}$ v pečico s kontrolirano temperaturo $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri tem je zamašek nekoliko odvit, da preprečimo nastanek nadtlaka.
- Vsebino posode nato z mešalnikom mešamo $5\text{ min} \pm 2\text{ s}$. Mešalo mešalnika se pri tem nahaja na višini $5\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ nad dnem posode. Hitrost mešanja je $1500\text{ vrt/min} \pm 50\text{ vrt/min}$.
- Posodo s popuščenim zamaškom ponovno damo v pečico s kontrolirano temperaturo $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ za $70\text{ h} \pm 1\text{ h}$. Po približno 30 minutah trdno privijemo pokrov, da preprečimo izparevanje vode.
- Posodo nato vzamemo iz pečice in pustimo pri sobni temperaturi na temen $24\text{ h} \pm 2\text{ h}$. Najbolje je, da vse tri testne vzorce pripravimo na isti dan, da kasneje opisane korake filtracije lahko opravimo 4 dni kasneje.

- Membranski filter iz mešanih celuloznih estrov, premera 47 mm in velikosti por 0,8 µm položimo v petrijevko, to pa v pečico s temperaturo 70 °C ±2 °C za 10 minut. Med tem in vsemi nadaljnji postopki filtrsko membrano s pinceto prijemamo samo na robovih.

Nato pripravimo filtrirno napravo, skladno s standardom. Filtriranje opravimo po naslednjem postopku:

- Z regulatorjem tlaka nastavimo tlak komprimiranega zraka ali dušika v primeru viskoznosti olja ISO VG 32 in VG 46 na 100 kPa ±5 kPa.
- S pipeto na filtrsko membrano dodamo tolikšno količino pripravljenega vzorca olja, da ravno prekrije celotno membrano.
- Laboratorijski vzorec premešamo, tako da embalažo v 60 s ±10 s močno 30-krat obrnemo. Takoj nato celotno količino vzorca zlijemo v filtrirni lijak, zapremo pokrov tlačne posode in odpremo krogelni ventil.
- Začnemo z merjenjem časa, ko prva kapljica olja iz tlačne posode skozi filtrsko membrano pade v merilni valj. Izmerimo čase filtracije 10 ml (T_{10}), 50 ml (T_{50}), 200 ml (T_{200}) in 300 ml (T_{300}) olja.

Takoj, ko izmerimo čas T_{50} , izračunamo čas T_V po enačbi (4.7).

$$T_V = 6(T_{50} - T_{10}) + T_{10} \quad (4.7)$$

T_{50} [s] – izmerjen čas filtracije 50 ml olja

T_{10} [s] – izmerjen čas filtracije 10 ml olja

Izmerimo volumen olja V , ki je v času T_V , izračunanem po enačbi (4.7), stekel v merilni valj. Na tem mestu test prekinemo, če določamo le sposobnost filtracije v Stopnji I ali če je čas filtracije največjega zahtevanega volumna (ali T_V ali T_{300}) daljši od 7200 s (2 h).

Izračun sposobnosti filtracije v Stopnji I opravimo po enačbi (4.8).

$$F_I = \frac{V - 10}{240} \cdot 100 \quad (4.8)$$

V [ml] – filtrirani volumen v času T_V

Sposobnost filtracije v stopnji I je v odstotkih izraženo razmerje med 240 ml olja in dejansko filtriranim volumnom v času, ki bi ga teoretično zahtevalo filtriranje 240 ml, če ne bi bilo mašenja filtrske membrane.

Izračun sposobnosti filtracije v Stopnji II opravimo po enačbi (4.9).

$$F_{II} = \frac{2,5 (T_{50} - T_{10})}{T_{300} - T_{200}} \cdot 100 \quad (4.9)$$

T_{50}	[s]	– izmerjen čas filtracije 50 ml olja
T_{10}	[s]	– izmerjen čas filtracije 10 ml olja
T_{200}	[s]	– izmerjen čas filtracije 200 ml olja
T_{300}	[s]	– izmerjen čas filtracije 300 ml olja

Sposobnost filtracije v stopnji II je v odstotkih izraženo razmerje med pretokom v bližini začetka filtracije in pretokom v območju med 200 ml in 300 ml filtriranega volumna.

Rezultate testa sposobnosti filtracije v Stopnji I ali v Stopnji II podajamo kot »pass« t.j. izpolnjuje oz. »fail« t.j. ne izpolnjuje glede na mejno vrednost 50. Rezultatom nad 50 lahko dodamo v oklepaju poprečje izmerjenih vrednosti. V primeru, da čas filtracije presega 7200 s (2 h), kot rezultat podamo »ni filtrabilno«.

Pri določanju sposobnosti filtracije brez prisotnosti vode je postopek filtracije enak, odpade pa zgoraj opisani postopek dodajanja vode in ogrevanja vzorcev v pečici.

Quaker metodo določanja sposobnosti filtracije smo uporabili, ker sami nismo imeli na razpolago vse potrebne opreme za izvedbo meritev. Vzorce ionskih tekočin EMIM-EtSO₄, IL-17PI045 in mineralnega olja Hydrolubric VG 46 smo testirali v podjetju Quaker B.V., ki med ostalim proizvaja tudi težko vnetljive hidravlične tekočine. Poleg navedenih 3 vzorcev smo zato v testiranje vključili tudi Quintolubric 888-46, šarža 1005 272792 in Quintolubric 888-68, šarža 1004 273681, ki sta težko vnetljivi hidravlični tekočini vrste HFDU, poleg tega pa sta tudi biološko hitreje razgradljivi hidravlični tekočini [65]. Tudi podjetje Quaker B.V. je moral poiskati kompromis med predpisano in razpoložljivo opremo. Predpisanim testnim pogojem so se skušali čim bolj približati. Odstopanja od standardnih zahtev so bila naslednja:

- Filtrirna naprava je imela le 180 ml volumna namesto predписанega volumna 330 ml.
- Komprimirani zrak je imel tlak 70 kPa namesto predписанega 100 kPa za viskoznost ISO VG 46, oziroma 200 kPa za viskoznost ISO VG 68.

- Ker izračun sposobnosti filtracije v stopnji I in stopnji II temelji na 330 ml tekočine, je bilo potrebno spremeniti izračun, saj je bilo v našem primeru uporabljeno le 150 ml tekočine. Tudi v tem primeru so bile uporabljenе standardne enačbe, vendar sta bila volumna T_{300} in T_{200} določena z linearno funkcijo, izpeljano iz prvih treh merilnih točk.

Skladno s testno metodo smo izmerili čase, v katerih je 10 ml, 50 ml in 150 ml olja skozi filtrski element steklo v merilni valj. Zaradi omejene kapacitete filtrske naprave je bilo 150 ml največja količina. Da bi lahko izračunali sposobnost filtracije v stopnji II po enačbi (4.9), smo morali iz teh treh vrednosti izpeljati funkcijo, ki nam je omogočila oceno časa filtracije 200 ml in 300 ml olja. Skladno s testno metodo smo izmerili čase, v katerih je 10 ml, 50 ml in 150 ml olja skozi filtrski element steklo v merilni valj.

Za Quintolubric 888-46 brez dodane vode so bili izmerjeni naslednji časi filtracije:

- 10 ml: 14 s,
- 50 ml: 57 s,
- 70 ml: 79 s,
- 90 ml: 102 s,
- 110 ml: 124 s,
- 150 ml: 167 s.

S temi rezultati smo določili linearno funkcijo: $y = 1.0979*X + 2.6786$ ($R^2 = 0.9999$), kjer je X volumen filtriranega olja v ml. Pri tem smo uporabili dodatne merilne točke 70 ml, 90 ml in 110 ml, da bi dobili večjo natančnost linearne funkcije, ki se odraža v boljšem koeficientu korelacije. Te točke niso zahtevane v uradni testni metodi, toda zaradi omejenega volumna filtrirne naprave smo se odločili, da jih uporabimo za dosego dobre korelacijske funkcije.

Preglednica 4.4: Sposobnost filtracije za Quintolubric 888-46 in Quintolubric 888-68

Standard ISO 13357-1 in ISO 13357-2	Sposobnost filtracije		
Vzorec	Stopnja I	Stopnja II	Rezultat
Quintolubric 888-46, š. 1005272792; brez vode	98,6	98,7	izpolnjuje
Quintolubric 888-46, š. 1005272792; 0,2 % vode	105,6	105,6	izpolnjuje
Quintolubric 888-68, š. 1004273681; brez vode	99,9	99,8	izpolnjuje
Quintolubric 888-68, š. 1004273681; 0,2 % vode	100,6	100,6	izpolnjuje

Če v dobljeno linearno funkcijo vstavimo $X = 200$ in $X = 300$ dobimo časa 222 in 332 sekund. S temi vrednostmi smo lahko izračunali sposobnost filtracije v stopnji II.

Enak postopek smo uporabili tudi v ostalih primerih določanja sposobnosti filtracije.

Po pričakovanju imata Quintolubric 888-46 in Quintolubric 888-68 dobro sposobnost filtracije, saj je v obeh primerih sposobnost filtracije v stopnji I in stopnji II bistveno višja od 50. Rezultate prikazuje preglednica 4.4.

Na opisani način smo želeli določiti tudi **sposobnost filtracije obeh vzorcev ionskih tekočin**. V standardu ISO 13357-1, oziroma ISO 13357-2 je navedeno, da je testno metodo poleg mineralnih olj, mogoče uporabiti tudi za druge tekočine, vendar te morda niso združljive z membranskimi filterji. V našem primeru se je to izkazalo za resnično, saj sta obe ionski tekočini deformirali celulozno filtrske membrane in določanje sposobnosti filtracije po tej metodi ni bilo možno. Ker podjetje Quaker B.V. ni imelo doslej nikakršnih izkušenj z določanjem sposobnosti filtracije ionskih tekočin, so najprej določali združljivost obeh ionskih tekočin in predpisanega 0.8 mikrometrskega celuloznega filtrskega elementa. V ta namen so 3 ml vzorčne tekočine nakapljali preko filtrskega elementa in opazovali vpliv tekočine po 5 minutnem kontaktu z njim. Rezultate prikazuje slika 4.8.



Slika 4.8: Združljivost ionskih tekočin in mineralnega olja s celuloznim filtrskega elementom

Filtrski element prekrit z IL-17PI045 je začel razpadati takoj po kontaktu s tekočino in se je stopil (slika 4.8-levo). Vzorec ionske tekočine EMIM-EtSO₄ je filtrski element deformiral v steklast krog (slika 4.8-sredina), vzorec mineralnega hidravličnega olja Hydrolubric VG 46, š. 9675 pa je povzročil želiranje (slika 4.8-desno). Zaključek podjetja Quaker B.V. je bil, da nobenega od posredovanih vzorcev ni možno filtrirati skladno s

standardom ISO 13357. Razlog za to je, da standard zahteva filtriranje skozi 0,8 mikrometrski filtrski element ob prisotnosti tlaka, ki je odvisen tudi od viskoznosti. Pri višjih viskoznostih mora biti tlak višji. Z raztopljenimi, deformiranimi filtrskimi elementi bi dobili nerealne podatke.

Združljivost različnih tekočin s celuloznimi filtrskimi elementi smo žeeli preveriti tudi sami. Predvsem zato, ker nas je presenetila ugotovitev, da je celulozni filtrski element nezdružljiv celo z mineralnim hidravličnim oljem Hydrolubric VG 46, za katerega iz dolgoletnih praktičnih izkušenj vemo, da ima dobro sposobnost filtracije in z njim nismo imeli težav pri uporabi različnih filtrskih elementov, tudi celuloznih. Postopek in rezultati našega testa so opisani v točki 4.2.2.

4.2.2 Združljivost s celuloznim filtrirnim papirjem

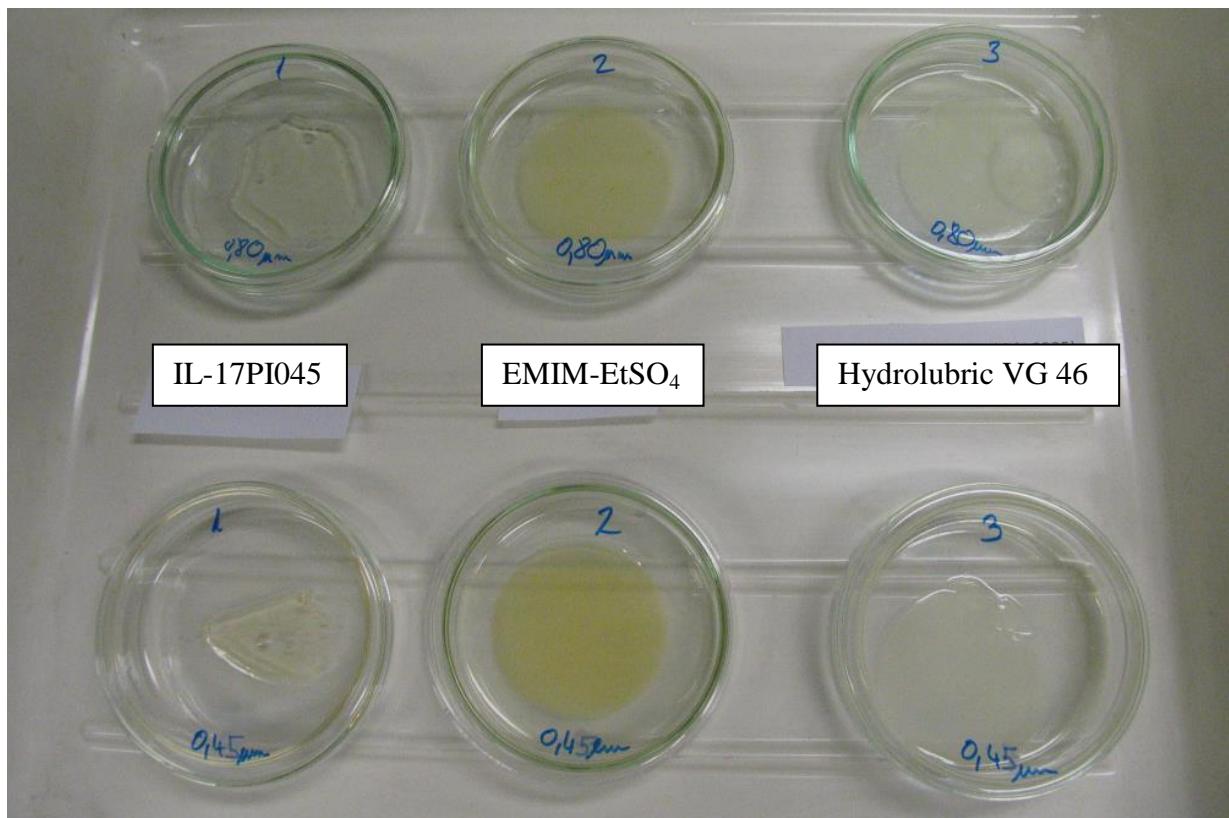
Glede na negativni vpliv ionskih tekočin IL-17PI045 in EMIM-EtSO₄ ter mineralnega hidravličnega olja Hydrolubric VG 46 na celulozni filtrirni papir, ki ga je ugotovilo podjetje Quaker B.V. pri poskusu določitve sposobnosti filtracije po standardu ISO 13357 (poglavlje 4.2.1), smo tudi sami opravili dodatno analizo.

Za test združljivosti omenjenih tekočin s celuloznim filtrirnim papirjem smo uporabili 0,45 µm filtrirni papir tipa ME 25 (Schleicher & Schuel) in 0,8 µm filtrirni papir tipa ME 27 (Whatman). Filtrirni papir smo prekrili s tankim slojem omenjenih tekočin in opazovali njihov vpliv (slika 4.9).

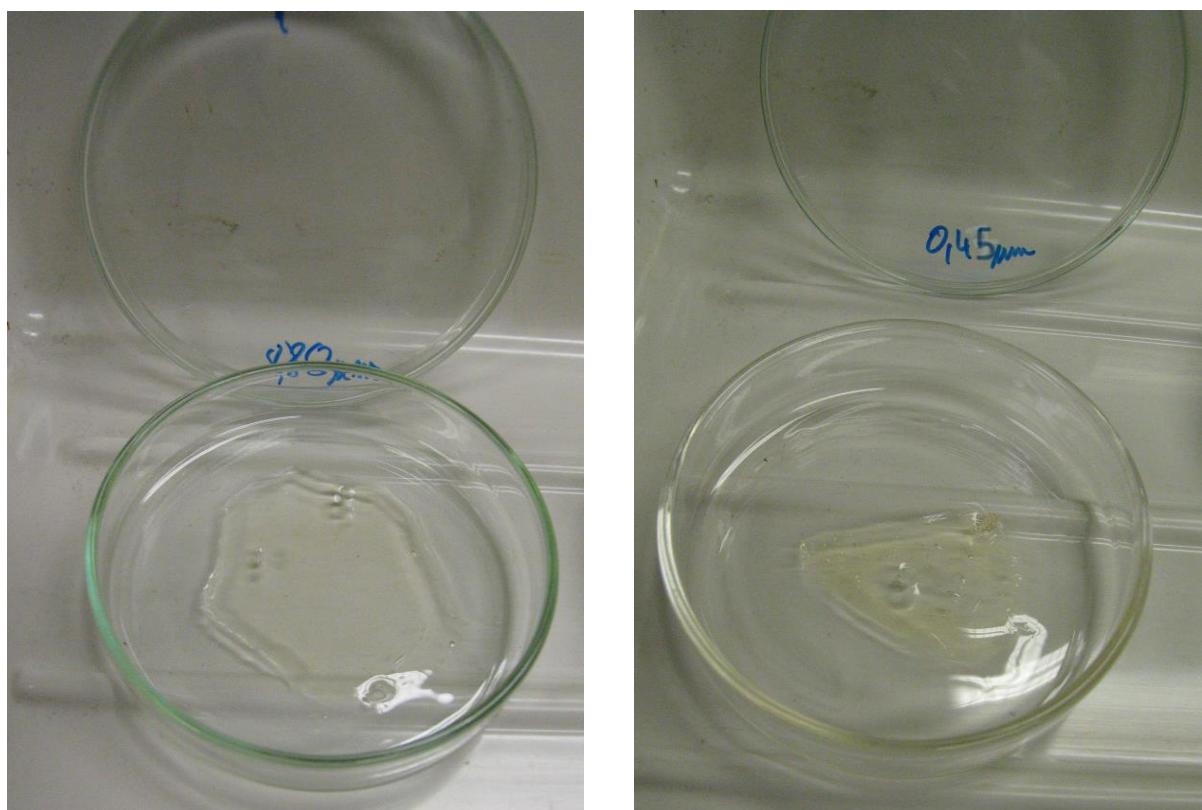
Filtrirni papir, prekrit z ionsko tekočino IL-17PI045 se je po 5 minutah nagubal in po 15 minutah postal želatinast (slika 4.10).

Kot prikazuje slika 4.11 ionska tekočina EMIM-EtSO₄ in mineralno hidravlično olje Hydrolubric VG 46 nista imela takšnega učinka na filtrirni papir. Filtrirni papir, prekrit z EMIM-EtSO₄, je postal le nekoliko krhek (slika 4.12 levo). Filtrirni papir prekrit s Hydrolubric VG 46 ni postal želatinast, je pa absorbiral olje – prosojen krog (slika 4.12 desno).

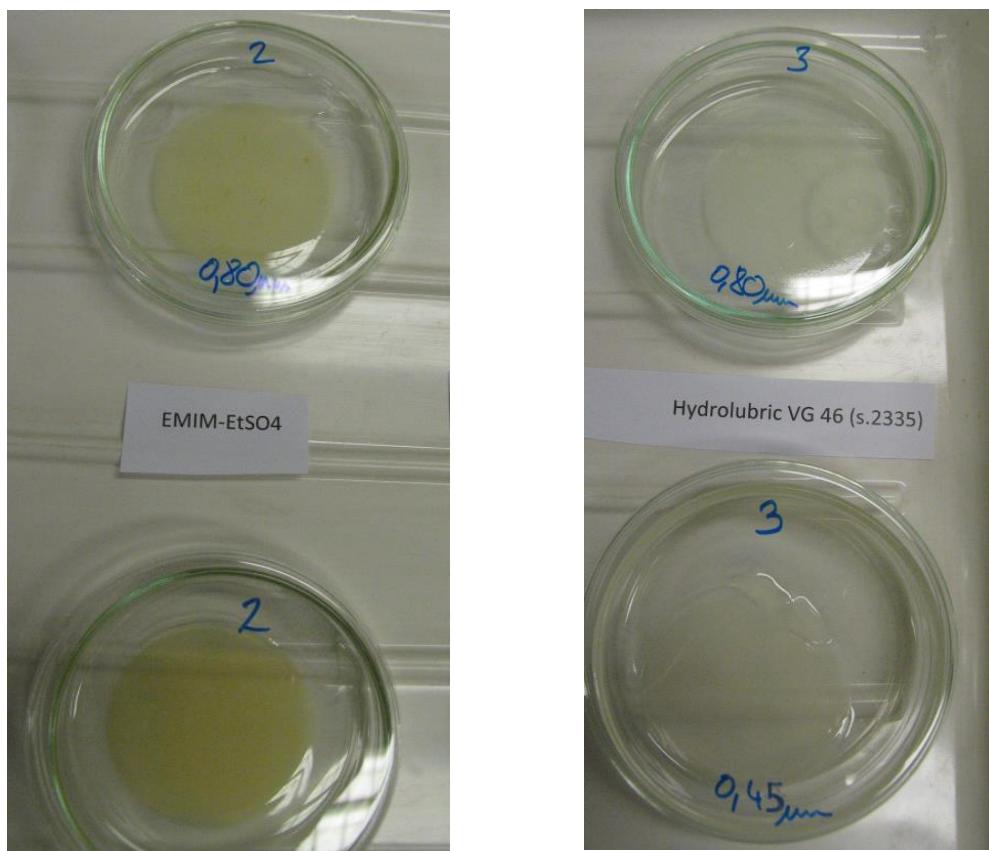
Tudi pri našem testiranju se je potrdilo, da celulozni filtrirni papir ni združljiv z ionsko tekočino IL-17PI045, pogojno združljiv je tudi z ionsko tekočino EMIM-EtSO₄. Mineralno hidravlično olje Hydrolubric VG 46 je združljivo z uporabljenim celuloznim filtrirnim papirjem.



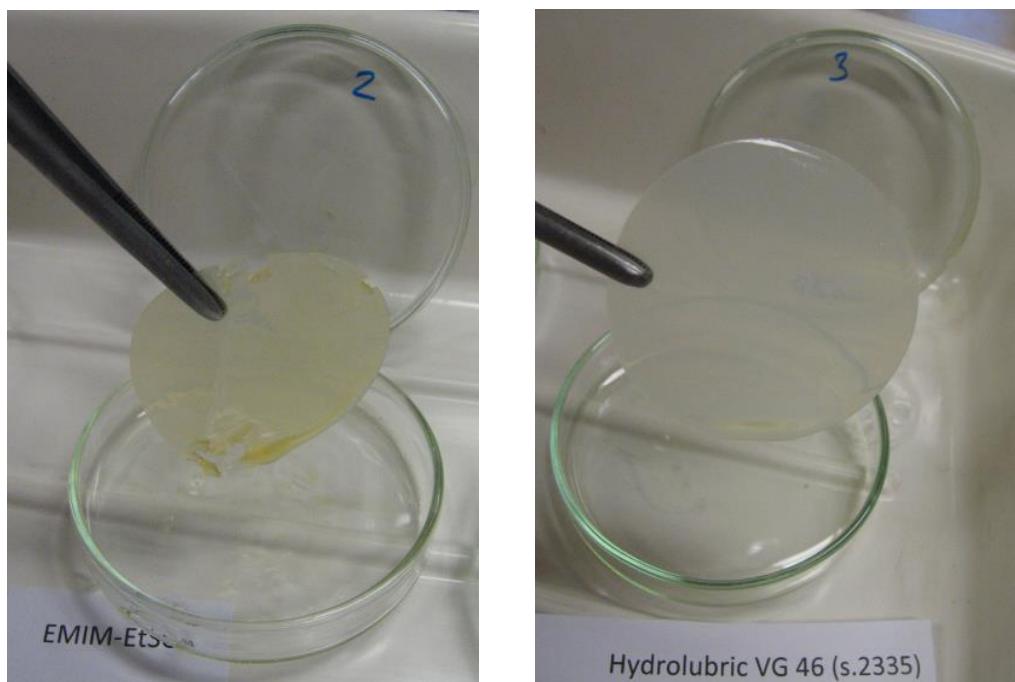
Slika 4.9: Združljivost ionskih tekočin in mineralnega olja s celuloznim filtrirnim papirjem



Slika 4.10: Združljivost IL-17PI045 s celuloznim filtrirnim papirjem



Slika 4.11: Združljivost EMIM-EtSO₄ in Hydrolubric VG 46 s celuloznim filtrirnim papirjem



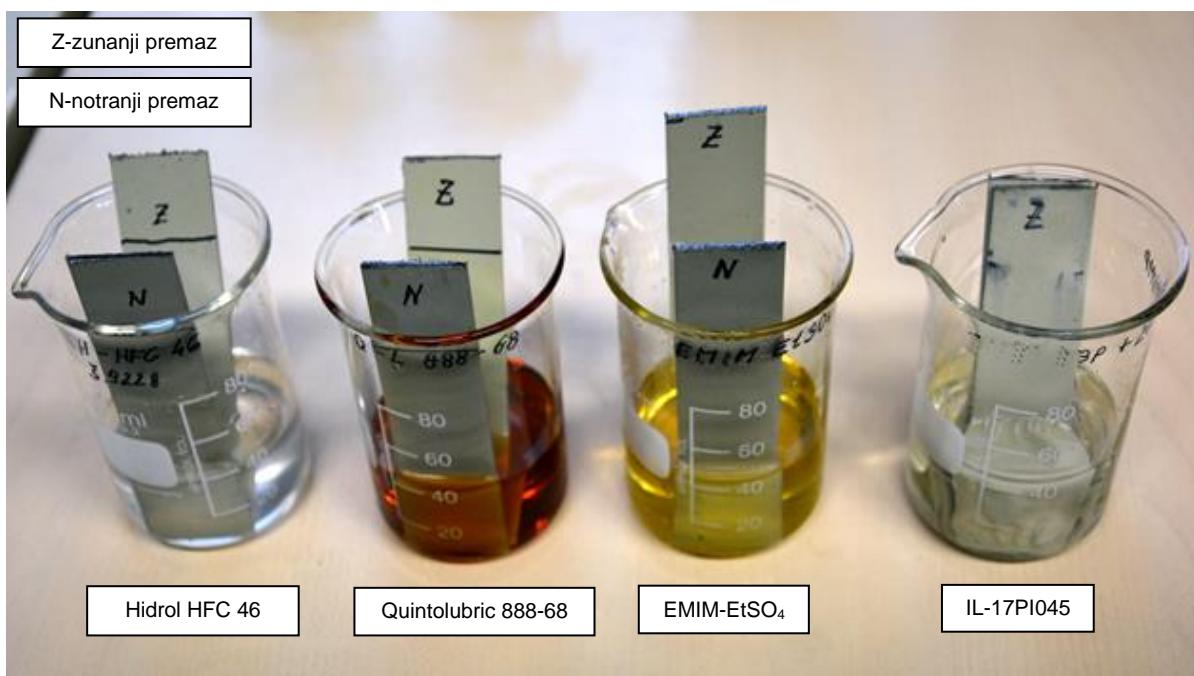
Slika 4.12: Združljivost EMIM-EtSO₄ in Hydrolubric VG 46 s celuloznim filtrirnim papirjem

Glede na rezultate testiranja sposobnosti filtracije po ISO 13357 (poglavlje 4.2.1) in združljivosti s celuloznim filtrirnim papirjem, prikazanim v tem poglavju, lahko zaključimo, da ionski tekočini IL-17PI045 in EMIM-EtSO₄ nista združljivi s celuloznim filtrirnim papirjem. Zato uporabo celuloznih filtrirnih elementov v hidravličnih sistemih s tem dvema tekočinama odsvetujemo. Sposobnost filtracije skozi filtrirne elemente iz drugih materialov, na primer steklenih vlaken, pa bi bilo potrebno še ugotoviti.

4.2.3 Združljivost z barvnimi premazi

Večina rezervoarjev hidravličnih sistemov je lakiranih tako znotraj, kot tudi zunaj. Zaradi tega je zelo pomembno, da je uporabljena hidravlična tekočina združljiva z uporabljenim barvnim premazom.

Opravili smo primerjalni test združljivosti dveh ionskih tekočin EMIM-EtSO₄ in IL-17PI045 z dvema težko vnetljivima hidravličnima tekočinama Hidrol HFC 46 (vrsta HFC) in Quintolubric 888-68 (vrsta HFDU). Podjetje Seal & Trade d.o.o. nam je posredovalo vzorce pločevine, ki jo uporabljajo za izdelavo rezervoarjev. Vzorci pločevine so bili lakirani z barvama, ki ju uporabljajo za notranjo in zunanjo stran rezervoarjev. Notranjo stran lakirajo z epoksi temeljnim premazom **Rezistol osnovna barva E-ZP** (proizvajalec Helios d.o.o.), zunanjo stran pa dodatno še z epoksi debeloslojnim pokrivnim premazom **Rezistol emajl E dbs** (proizvajalec Helios d.o.o.). Nekaj vzorcev pločevine je bilo lakiranih samo z notranjo barvo, nekaj pa dodatno še z barvo za zunanjo stran rezervoarjev.



Slika 4.13: Test združljivosti z barvnimi premazi

Test smo opravili tako, da smo v steklene čaše nalili okoli 40 ml vsake od tekočin, nato pa vanje vstavili po en vzorec pločevine, premazan z barvnim premazom za notranje strani in en vzorec pločevine, premazan z barvnim premazom za zunanje strani rezervoarjev. Na začetku testiranja smo celotno pločevino omočili s testno tekočino, med testiranjem pa je bil spodnji del pločevine stalno potopljen v tekočino, zgornji del pa nad gladino, kot prikazuje slika 4.13.

Že po nekaj dneh testa se je pokazalo, da ionska tekočina IL-17PI045 ni združljiva ne s premazom za notranje strani rezervoarjev ne s premazom za zunanje strani rezervoarjev. Prišlo je namreč do gubanja in odstopanja barvnega premaza na delu pločevine, ki je bil stalno potopljen v testno tekočino. Stanje po 4 dneh testa te tekočine prikazuje slika 4.14.

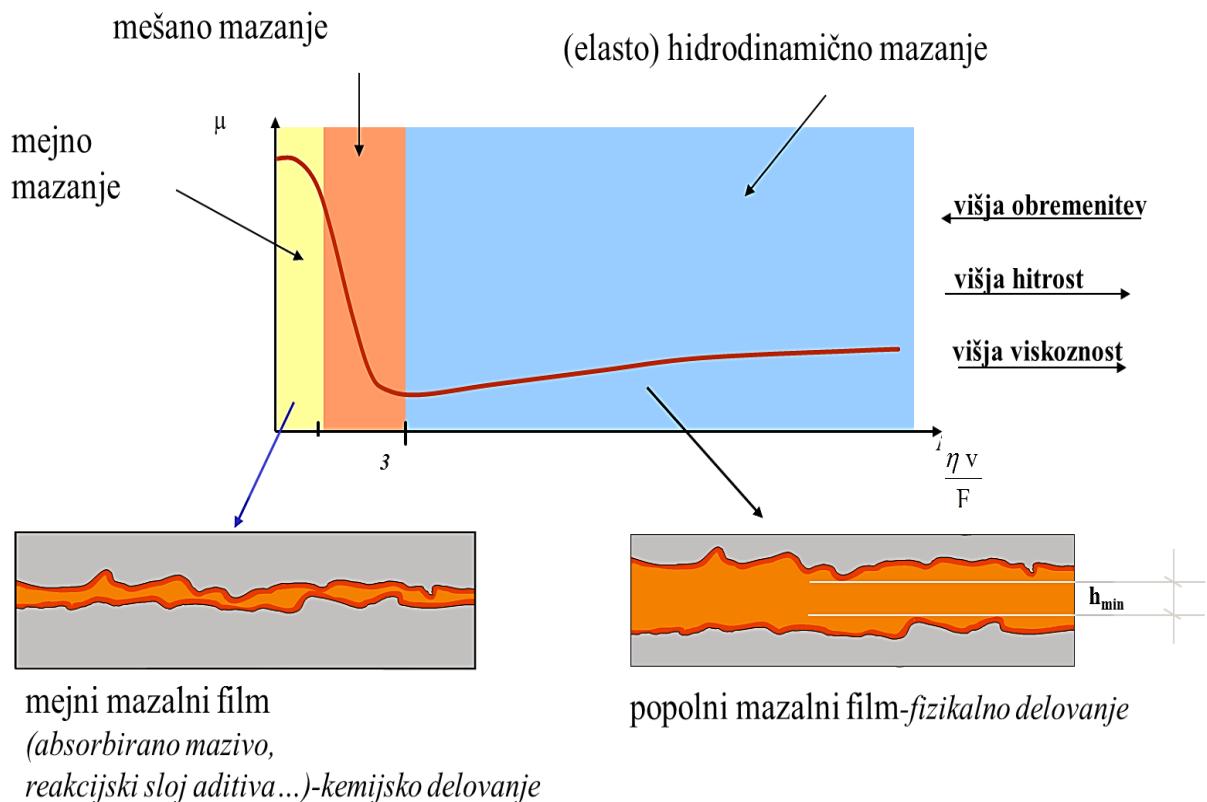


Slika 4.14: Ionska tekočina IL-17PI045 in lakirana pločevina

Pri ostalih treh testiranih tekočinah po več kot 7 mesecih testiranja ni bilo nikakršnih sprememb stanja lakirane pločevine, ne na stalno potopljenem delu pločevine ne na omočenem delu nad gladino. Ionska tekočina EMIM-EtSO₄ in težko vnetljivi hidravlični tekočini Hidrol HFC 46 ter Quintolubric 888-68 so torej združljive z običajnimi barvnimi premazi pločevine rezervoarjev.

4.2.4 Meritev Stribeckove krivulje

Večina triboloških sistemov vključuje mazivo, ki zmanjšuje trenje in obrabo. Kadar želimo predstaviti kvaliteto mazanja, to najlaže storimo s tako imenovano Stribeckovo krivuljo (slika 4.15), ki nam predstavlja koeficient trenja v odvisnosti od Stribeckovega parametra, ki vključuje viskoznost, relativno hitrost površin in obremenitev.



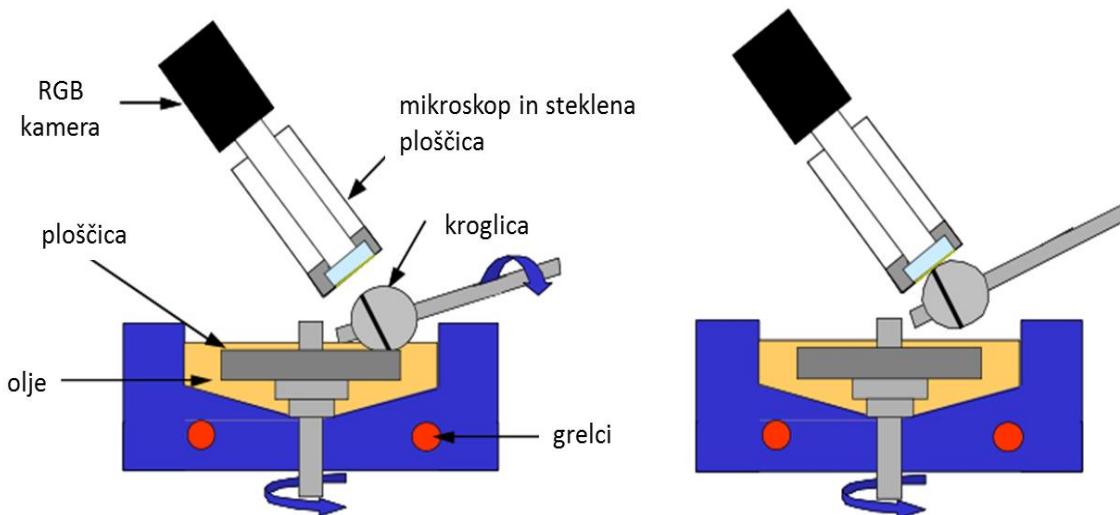
Slika 4.15: Stribeckova krivulja in vplivne veličine na kvaliteto mazanja

V osnovi se kvaliteta mazanja izboljuje, ko se po horizontalni osi Stribeckove krivulje pomikamo desno. Kombinacija nizke hitrosti, nizke viskoznosti in visoke obremenitve bo povzročila mejno mazanje, za katerega je značilna majhna količina maziva v prostoru med površinama in velika površina neposrednega kontakta. Na Stribeckovi krivulji vidimo, da se to odraža z zelo visokim trenjem. V triboloških sistemih mejno mazanje nastopa ob zagonih in zaustavitvah. V tem območju mazivo deluje predvsem kemijsko in ima zelo velik vpliv. Z naraščanjem hitrosti in viskoznosti ali zmanjševanjem obremenitve postopno prihaja do ločevanja obeh površin in tvorjenja mazalnega filma, ki je sicer tanek in nepopoln, vendar že izboljša kvaliteto mazanja, kar se odraža s strmim zmanjševanjem koeficienta trenja. To področje imenujemo mešano mazanje. Ločevanje površin z naraščanjem hitrosti in viskoznosti ter zmanjševanjem obremenitve se nadaljuje, dokler se ne ustvari popoln mazalni film brez neposrednih kontaktov površin, zaradi česar se trenje zmanjša na minimum in preidemo v območje hidrodinamičnega mazanja, v katerem obrabe praktično ni. Mazivo v tem območju deluje predvsem fizikalno.

Meritev Stribeckove krivulje za mineralno hidravlično olje Hydrolubric VG 46 in ionski tekočini IL-17PI045 ter EMIM-EtSO₄ nam je opravil laboratorij za tribologijo in površinsko

nanotehnologijo (TINT) na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Za ta namen je bila uporabljena naprava MTM (Mini Traction Machine).

MTM je naprava za merjenje trenja in debeline mazalnega filma s kroglica-disk konfiguracijo. Shemo naprave prikazuje slika 4.16. Kroglica premera 19,05 mm (3/4 inča) s hrapavostjo $Ra < 0,02 \mu\text{m}$ in trdoto 800 HV-920 HV pod obremenitvijo nalega na disk premera 46 mm s hrapavostjo $Ra < 0,01 \mu\text{m}$ in trdoto 720 HV-780 HV. Oba sta iz enakega materiala DIN 100Cr6. Disk je v celoti potopljen v preizkušano tekočino, katere količina znaša približno 35 ml. Kroglica in disk sta gnana neodvisno eden od drugega, tako da se preizkus lahko izvaja z različnim razmerjem kotaljenje-dršenje. Torna sila med kroglico in diskom se meri s pretvornikom sile.



Slika 4.16: MTM naprava: med testom (levo), fotografiranje kontaktne površine (desno)

Pri Stribeckovem testu smo spremenjali hitrost pri konstantnem razmerju dršenje-kotaljenje. Hitrost smo v 20 logaritemskih korakih zmanjševali od 2 m/s do 0,01 m/s pri razmerju dršenje-kotaljenje 50 %. S tem smo dosegli različne režime mazanja. Pritisna sila je znašala 35 N, kar pri dani geometriji kroglice in diska daje Herzov kontaktni tlak 1 GPa.

Razmerje dršenje-kotaljenje (Slide-to-Roll Ratio) je definirano z enačbo (4.10). Pri tem za posamezno razmerje naprava pri meritvi enkrat vrti hitreje disk, drugič pa hitreje kroglico.

$$SRR = \frac{U_{drs}}{U_{sr}} = \frac{|U_{kr} - U_{pl}|}{(U_{kr} - U_{pl})/2} \cdot 100 \quad (4.10)$$

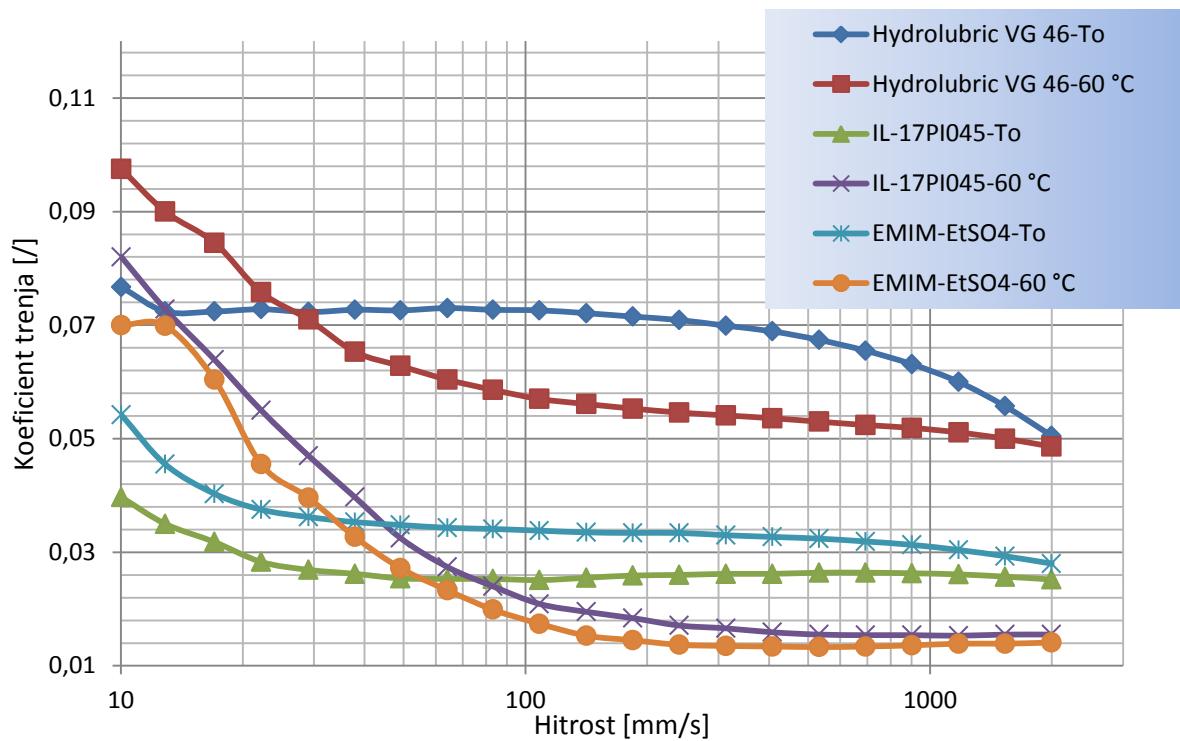
U_{drs} [m/s] – hitrost drsenja kroglice in diska

U_{sr} [m/s] – srednja hitrost drsenja kroglice in diska

U_{kr} [m/s] – hitrost kroglice

U_{pl} [m/s] – hitrost ploščice

Izmerjene Stribeckove krivulje za vse tri tekočine pri temperaturi okolice T_o in pri temperaturi 60°C prikazuje slika 4.17.



Slika 4.17: Izmerjene Stribeckove krivulje

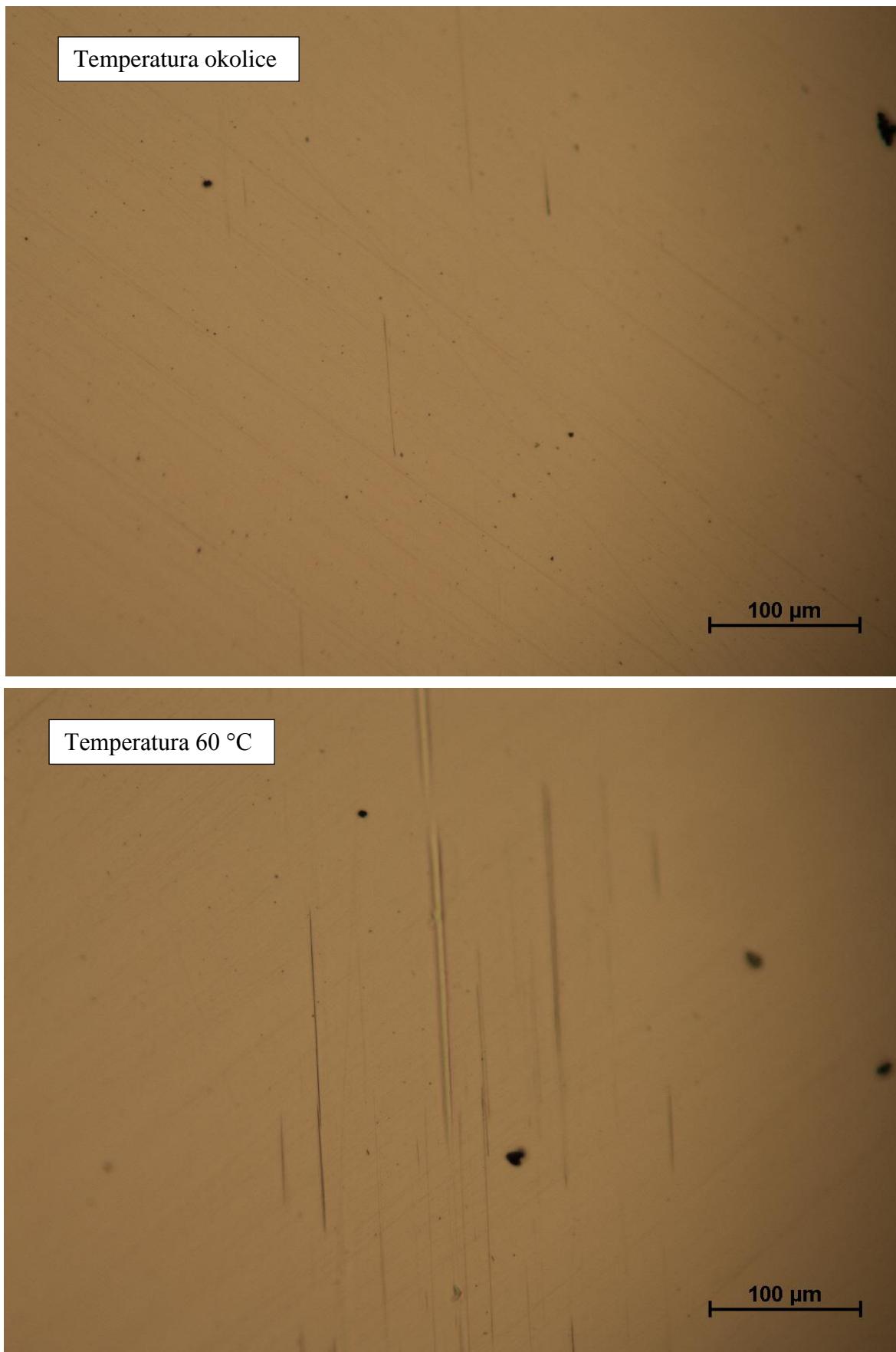
Vidimo, da je koeficient trenja mineralnega hidravličnega olja v celotnem območju bistveno višji kot pri obeh ionskih tekočinah. Ionski tekočini imata zelo podoben koeficient trenja v celotnem območju, pri čemer ima IL-17PI045 nekoliko nižjega pri sobni temperaturi, EMIM-EtSO₄ pa pri 60°C . Pri vseh treh tekočinah je razlika med najnižjo in najvišjo izmerjeno vrednostjo veliko večja pri 60°C , kot pa pri sobni temperaturi. Prav tako je pri višji temperaturi koeficient trenja v področju mejnega in mešanega mazanja višji, v področju elastohidrodinamičnega mazanja pa nižji. Razlog je verjetno manjša debelina mazalnega filma

pri višji temperaturi, ki ima za posledico več neposrednih kontaktov površine kroglice in diska v področju mejnega in mešanega mazanja.

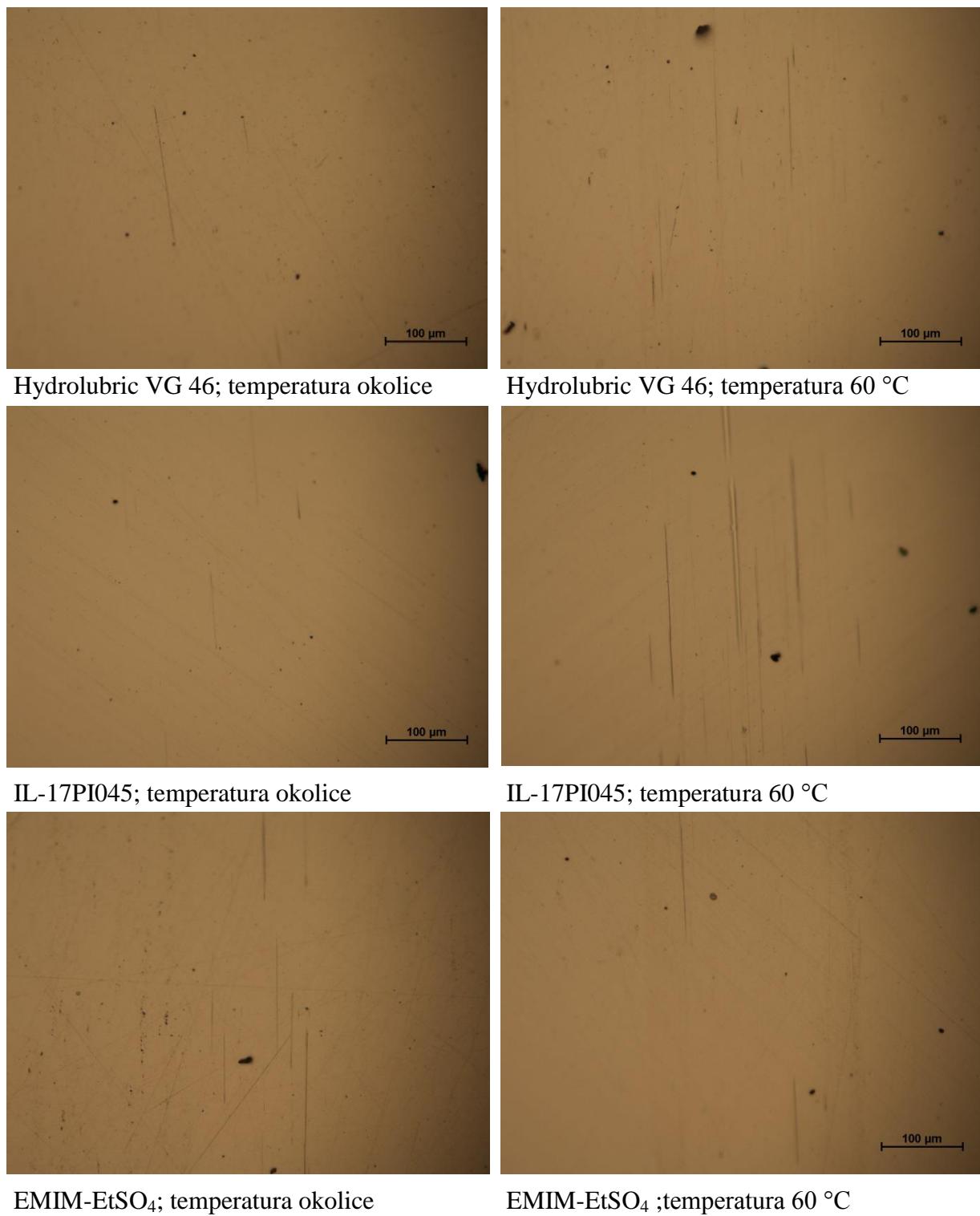
Posnete so bile tudi slike površine diskov po končani meritvi Stribeckove krivulje. Podrobnejši pogled pokaže, da je pri Hydrolubricu VG 46 in IL-17PI045 površina bolj poškodovana po meritvi Stribeckove krivulje pri temperaturi 60 °C kot pa po meritvi pri temperaturi okolice. To se sklada z izmerjenimi koeficienti trenja (slika 4.17), ki so pri temperaturi 60 °C v področju mejnega in mešanega mazanja bistveno višji kot pa pri temperaturi okolice. Višje trenje v tem področju je verjetno tudi povzročilo večjo obrabo diskov. Primerjavo površin diskov po meritvi Stribeckove krivulje pri temperaturi okolice in pri 60 °C za ionsko tekočino IL-17PI045 prikazuje slika 4.18. Pri ionski tekočini EMIM-EtSO₄ bistvene razlike v videzu površine po meritvah pri temperaturi okolice in 60 °C ni. Pri tej tekočini je bila razlika v izmerjenih koeficientih trenja v področju mejnega in mešanega mazanja pri obeh temperaturah tudi najmanjša, tako da se videz površine tudi v tem primeru sklada z izmerjenimi vrednostmi koeficiente trenja.

Sicer pa zelo velikih razlik v površinah diskov po končanih meritvah nismo ugotovili. Slika 4.19 prikazuje primerjavo površin diskov po končanih meritvah Stribeckove krivulje za vse tri tekočine in obe temperaturi. Slike so bile posnete z optičnim mikroskopom pri 200-kratni povečavi.

Lahko zaključimo, da so mazalne lastnosti obeh ionskih tekočin s stališča koeficiente trenja bistveno boljše kot pri mineralnem hidravličnem olju.



Slika 4.18: IL-17PI045 - Površina diskov po meritvah Stribeckove krivulje



Slika 4.19: Površina diskov po meritvah Stribeckove krivulje

4.2.5 Električna prebojna trdnost-IEC 156, IEC 60156

V nekaterih primerih od hidravlične tekočine zahtevamo podobne lastnosti, kot jih imajo transformatorska olja, to so hlajenje, električna izolacija in oksidacijska stabilnost.

Hlajenje in oksidacijska stabilnost sta eni od osnovnih lastnosti, ki jih hidravlična olja morajo izpolnjevati, medtem ko je električna izolacija dodatna zahteva, ki jo je na primer potrebno izpolniti tedaj, ko je elektromotor potopljen v hidravlično olje. Na električno izolacijo vplivajo:

- vlažnost tekočine,
- vsebnost delcev,
- vsebnost plinov,
- drugi kontaminanti.

Tudi v našem primeru je bila osnovna ideja praktični preizkus ene ali več ionskih tekočin v manjšem hidravličnem agregatu, kjer bi bil elektromotor potopljen v olje. Po mednarodnem standardu IEC 60296, izdaja 4, 2012: »Tekočine za elektrotehnične aplikacije-Nerabljena mineralna izolacijska olja za transformatorje in stikala« prebojna napetost transformatorskega olja označuje njegovo odpornost na električno napetost v električni opremi. Prebojno napetost merimo skladno s standardom IEC 60156. Zahteva je, da ima olje po specialni vakuumski obdelavi² za zmanjšanje vsebnosti delcev, vode in raztopljenih plinov dielektrično trdnost, oziroma prebojno napetost >70 kV.

Test prebojne napetosti po metodi IEC 156 (po sedanji nomenklaturi to metodo označujemo z IEC 60156) uporabljamo za določanje električne prebojne napetosti. Vzorec olja je v standardnem aparatu izpostavljen naraščajočemu izmeničnemu električnem polju in sicer s konstantnim naraščanjem napetosti do nastopa preboja med elektrodama. Elektrodi sta lahko medeninasti, bronasti ali iz austenitega nerjavnega jekla. Osi morata biti horizontalni in potopljeni najmanj 40 mm pod gladino testiranega olja. Oddaljenost med elektrodama in stenami testne celice z volumnom 350 ml do 600 ml ali mešalom (opcijsko) mora znašati najmanj 12 mm. Razdalja med elektrodama mora biti 2,5 mm ±0,05 mm. Nove, obrabljene ali nepravilno skladiščene elektrode moramo očistiti po naslednjem postopku:

- vse površine očistimo s primernim hlapnim topilom in počakamo, da topilo izhlapi,
- poliramo s finim abrazivnim praškom, abrazivnim papirjem ali krpo,

² Vakuumski filtracija olja (tlak < 2,5 kPa) pri 60 °C skozi sintrane steklene filtre z največjo velikostjo por 2,5 µm.

- po poliranju očistimo z bencinom (kakovost reagenta, vrelišče 60 °C do 80 °C), nato še z acetonom,
- elektrodi namestimo v testno celico, jo napolnimo s čistim, nerabljenim izolacijskim oljem in povečujemo napetost med elektrodama do preboja (24 ponovitev).

Meritev prebojne napetosti izvedemo po naslednjem postopku:

- Embalažo s testnim oljem neposredno pred začetkom testa ročno nekajkrat močno pretresemo in obrnemo, da zagotovimo homogeno porazdelitev vsebovanih nečistoč.
- Neposredno pred začetkom testa izpraznimo testno celico in speremo stene, elektrodi in druge dele s testnim vzorcem. Testno celico ponovno izpraznimo in jo počasi napolnimo s testnim oljem, tako da ne pride do nastanka zračnih mehurčkov.
- Izmerimo in zabeležimo temperaturo tekočine.
- Testno celico namestimo v merilno napravo in vklopimo mešalo, če ga uporabljamo.
- Povečujemo napetost med elektrodama od 0 s hitrostjo $2,0 \text{ kV/s} \pm 0,2 \text{ kV/s}$ do nastopa preboja. Prebojna napetost je najvišja napetost, dosežena v trenutku odprtja tokokroga avtomatično (vzpostavljen oblok) ali ročno (detektiramo vidno ali slišno izpraznitve). Zabeležimo izmerjeno vrednost.
- Z isto polnitvijo testne celice opravimo šest prebojev z najmanj 2 minutnim premorom pred ponovno vzpostavitvijo napetosti. Preverimo, da med elektrodama ni plinskih mehurčkov.
- Izračunamo srednjo vrednost šestih prebojnih napetosti v kilovoltih.

Test prebojne napetosti po metodi IEC 156 nam je opravilo podjetje Acroni d.o.o. Testirali smo dve ionski tekočini IL-17PI045 in EMIM-EtSO₄ ter za primerjavo mineralno hidravlično olje Hydrolubric VG 46. Meritev je bila opravljena z aparatom Megger OTS 60 PB, ki ga prikazuje slika 4.20. Skladno s standardom sta bili opravljeni paralelni meritvi 2x6 meritev. Rezultate prikazuje preglednica 4.5.



Slika 4.20: Instrument Megger OTS 60PB

Preglednica 4.5: Prebojna napetost ionskih tekočin in mineralnega hidravličnega olja

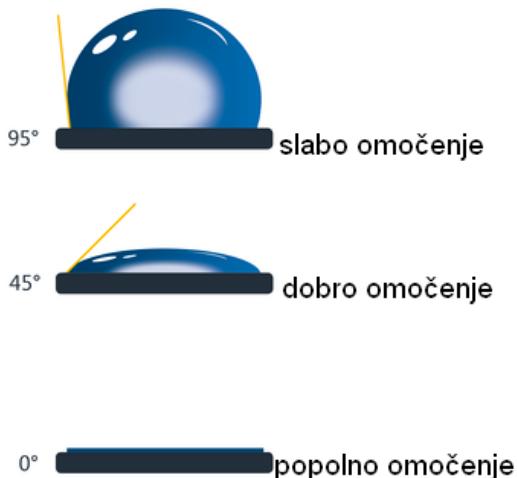
Vzorec	Prebojna napetost kV	Dielektrična trdnost kV/cm
EMIM-EtSO ₄	< 1,0	< 4
IL-17PI045	< 1,0	< 4
Hydrolubric VG 46	60	240

Prebojna trdnost olja Hydrolubric VG 46 je zelo dobra in je povsem primerljiva z najbolj kvalitetnimi transformatorskimi olji pred obdelavo (običajno 40 kV do 60 kV). Po običajni vakuumski filtraciji bi prav gotovo presegala 70 kV, kar je zahteva standarda IEC 60156.

Prebojna napetost obeh ionskih tekočin pa je zelo nizka. Zaradi tega nikakor nista primerni za aplikacije, kjer bi bil elektromotor potopljen v olje. Ta vidik je potrebno upoštevati v primeru gradnje hidravličnih sistemov z malimi, kompaktnimi agregati, kjer imajo nekatere izvedbe elektromotor (brez ohišja) neposredno potopljen v hidravlično tekočino. Pri običajnih hidravličnih agregatih ta lastnost hidravlične tekočine ni tako pomembna.

4.2.6 Kontaktni kot

Na mejni površini med tekočino in trdno snovjo označujemo kot med površino tekočine in orisom kontaktne površine kot kontaktni kot θ . Kontaktni kot je merilo za sposobnost omočenja trdnega telesa s tekočino. Pri popolnem omočenju znaša kontaktni kot 0° . Med 0° in 90° smatramo trdno telo kot omočljivo, nad 90° pa kot neomočljivo, oziroma slabo omočljivo (slika 4.21). Pri ultra hidrofobnih materialih s tako imenovanim Lotus učinkom se kontaktni kot bliža teoretični mejni vrednosti 180° [66].



Slika 4.21: Kontaktni kot in sposobnost omočenja na različnih materialih [66]

Po Young-ovi enačbi (4.11) obstaja medsebojna povezava med kontaktnim kotom θ , površinsko napetostjo tekočine σ_l , mejno površinsko napetostjo med tekočino in trdnim telesom γ_{sl} in prosto površinsko energijo trdnega telesa σ_s .

$$\sigma_s = \gamma_{sl} + \sigma_l \cdot \cos \theta \quad (4.11)$$

σ_s [mJ/m²] – prosta površinska energija trdnega telesa

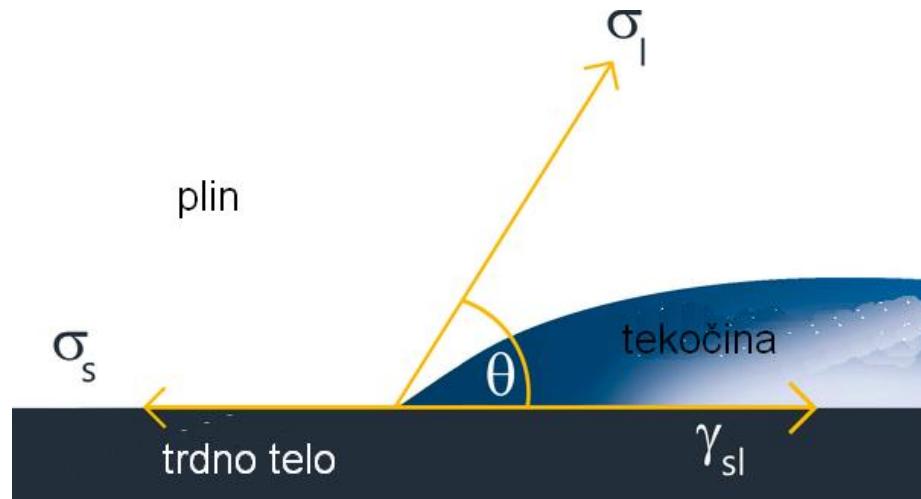
γ_{sl} [mN/m] – mejna površinska napetost med tekočino in trdnim telesom

σ_l [mN/m] – površinska napetost tekočine

θ [°] – kontaktni kot

Kot prosto površinsko energijo označujemo delo, ki je potrebno, da povečamo površino ene faze. Izraz prosta površinska energija uporabljam praviloma za površine trdnih teles. V

primeru tekoče faze pa večinoma govorimo o površinski napetosti. Shematično predstavitev kontaktnega kota podaja slika 4.22.



Slika 4.22: Shematična predstavitev kontaktnega kota [66]

Ena od metod določanja kontaktnega kota, uporabljena tudi v našem primeru, je analiza oblike kapljice DSA (Drop Shape Analysis). To je metoda analize obrisa ležeče kapljice. Kapljico doziramo na trdno podlago. S pomočjo kamere posnamemo obliko kapljice in prenesemo v program za DSA analizo. Z analizo sivin slike se najprej izvede prepoznavanje obrisa kapljice. V drugem koraku se obrisu kapljice privedi geometrijska oblika (krožni lok, elipsa, polinomska oblika, ...), ki ustreza obrisu kapljice.

Površine so zelo pomembne za vsak tribološki sistem, saj prve pridejo v stik z drugimi materiali (njihovimi površinami), poleg tega pa so neposredna povezava med materialom in okoljem. Za več parametrov velja splošno prepričanje, da so pomembni za tribološke površine in materiale, kot so trdota, hrapavost, elasto-plastične lastnosti itd., in se običajno upoštevajo pri oblikovanju triboloških sistemov. Vendar so prav tako zelo pomembni parametri omočljivost, hidro/oleofobnost in/ali hidro/oleofilnost, površinska energija in površinska napetost, ki so pomembni za vse mazane tribološke pogoje. Kljub tem očitnim korelacijam so ti parametri v triboloških študijah običajno zapostavljeni in jih ne upoštevamo v večini triboloških modelov in teorij [67], [68].

Pomen omočenja površine postaja vse večji, zato je kontrola omočenja neizogibna v številnih inženirskeih aplikacijah, vključno s tribologijo in nanotehnologijo. Kontaktni kot je pri nekaterih medijih in površinah neodvisen od časa (na primer voda), pri oljih pa se na večini površin, a ne na vseh, spreminja s časom, se postopoma zmanjšuje in se šele po 10 do 15 sekundah ustali. Kontaktni kot se lahko za isto olje pri različnih materialih površine zelo

razlikuje, prav tako pa se lahko zelo razlikuje v primeru enakega materiala površine in različnih olj. To nakazuje, da je pri določanju sposobnosti omočenja nekega olja pomembna tako kemična struktura, kot tudi njegova viskoznost. Pri enaki kemični strukturi bo višja viskoznost povzročila večjo površinsko napetost in polarnost. Kontaktni kot pri oljih linearno narašča z naraščanjem površinske napetosti [68].



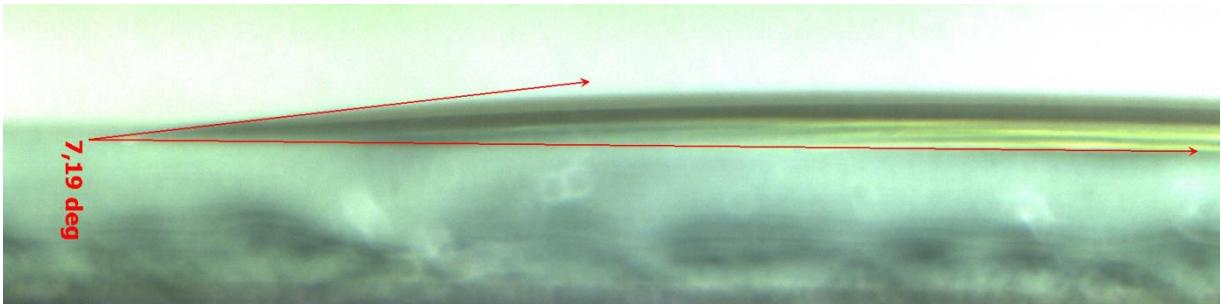
Slika 4.23: Stereomikroskop Zeiss Jena

Meritve kontaktnega kota za štiri vzorce nam je opravil Institut für Fertigungstechnik v okviru Tehnične univerze v Grazu. Meritev je bila opravljena s stereomikroskopom ZeissJena (slika 4.23). Kapljice testiranih tekočin so bile nanesene na steklene ploščice mikroskopa, meritev pa opravljena pri temperaturi okolice 23 °C. Za označevanje kontaktnega kota na slikah je bila uporabljena programska oprema AxioVision (Zeiss). Rezultati za kontaktni kot se pri posameznih meritvah iste tekočine nekoliko razlikujejo. Rezultate meritve kontaktnega kota za mineralno hidravlično olje Hydrolubric VG 46, težko vnetljivo hidravlično tekočino Quintolubric 888-68, ionsko tekočino IL-17PI045 in ionsko tekočino EMIM-EtSO₄ prikazuje preglednica 4.6.

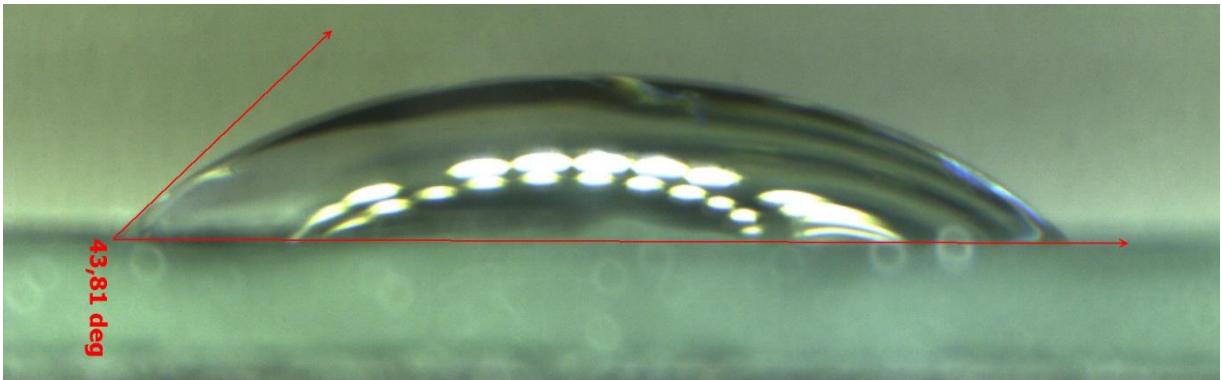
Preglednica 4.6: Izmerjeni kontaktni koti

Vzorec	Kontaktni kot [°]	Kontaktni kot [°]	Kontaktni kot [°]
Hydrolubric VG 46	26,95	26,13	24,85
Quintolubric 888-68	30,24	31,37	29,84
IL-17PI045	7,19	5,5	/
EMIM-EtSO ₄	43,59	43,81	/

Enega od izmerjenih kontaktnih kotov za ionsko tekočino IL-17PI045 prikazuje slika 4.24, za ionsko tekočino EMIM-EtSO₄ slika 4.25, za Hydrolubric VG 46 slika 4.26, za Quintolubric 888-68 pa slika 4.27.

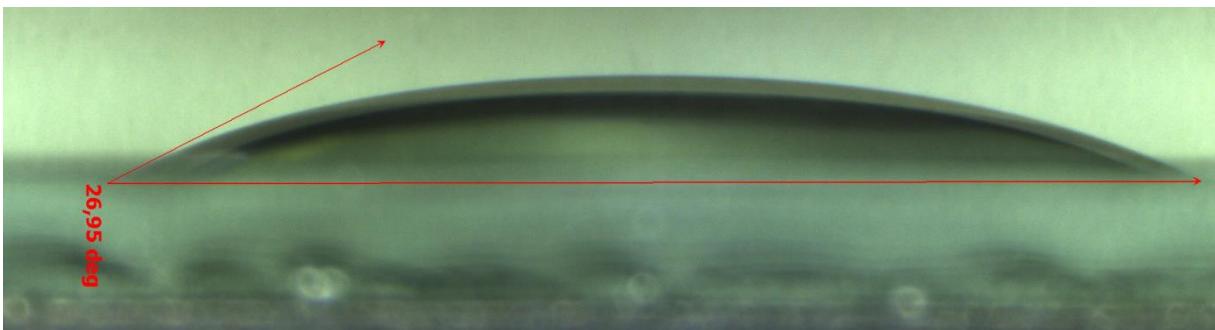


Slika 4.24: Kontaktni kot za IL-17PI045

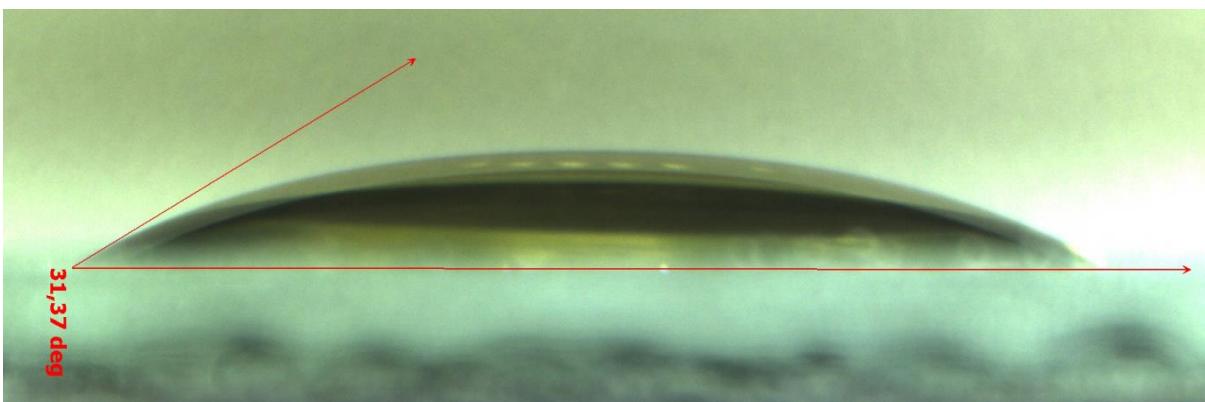
Slika 4.25: Kontaktni kot za EMIM-EtSO₄

Najmanjši kontaktni kot in s tem najboljše omočenje površine je bil izmerjen pri ionski tekočini IL-17PI045, največji in s tem najslabše omočenje pa pri ionski tekočini EMIM-EtSO₄. Kontaktni kot mineralnega hidravličnega olja Hydrolubric VG 46 je po velikosti med izmerjenima kontaktnima kotoma obeh ionskih tekočin. Z naraščanjem kontaktnega kota za navedene tri tekočine se sposobnost zaščite pred korozijo zmanjšuje (preglednica 5.1 v točki 5.1). To je pričakovano, saj naj bi boljše omočenje površine (manjši kontaktni kot) pomenilo tudi boljšo zaščito pred korozijo. Vendar pa tej ugotovitvi ne sledi težko vnetljiva hidravlična

tekočina Quintolubric 888-68, ki ima večji kontaktni kot od ionske tekočine IL-17PI045 in mineralnega hidravličnega olja Hydrolubric VG 46, sposobnost zaščite pred korozijo pa od vseh testiranih tekočin daleč najboljšo (preglednica 5.1 v točki 5.1). Očitno torej kontaktni kot omogoča sklepanje na sposobnost zaščite pred korozijo, ni pa edino merilo. Sklepamo, da je veliko odvisno tudi od uporabljenih inhibitorjev korozije, kar pa bi bilo potrebno dokazati s podrobnejšo študijo.



Slika 4.26: Kontaktni kot Hydrolubric VG 46



Slika 4.27: Kontaktni kot Quintolubric 888-68

4.3 Primerjava lastnosti ionskih tekočin z običajnimi hidravličnimi olji

Kljub nekaterim odličnim posameznim lastnostim ionskih tekočin, ki smo jih izmerili z metodami opisanimi v točkah 4.1 in 4.2, pa med številnimi testiranimi nismo uspeli najti takšne, ki bi združevala večino dobrih lastnosti, ki jih želimo od vrhunske hidravlične tekočine. V nadaljevanju je prikazana primerjava nekaterih izmerjenih rezultatov testiranih ionskih tekočin z danes običajno uporabljanim mineralnim hidravličnim oljem Hydrolubric VG 46, ki je olje kvalitetnega nivoja HLP po standardu DIN 51524-2.

Prva analizirana ionska tekočina je bila EMIM-EtSO₄. Rezultate meritev nekaterih fizikalno kemijskih lastnosti prikazuje preglednica 4.7. Rezultati korozijskih testov (vlažna

komora, korozivnost na baker, potapljanje jeklenih kroglic) so bili zelo različni. V primeru potapljanja jeklenih kroglic v ionsko tekočino ni bilo sledov korozije. Tudi rezultati testa korozivnosti na baker so bili dobri in popolnoma primerljivi z mineralnim hidravličnim oljem in težko vnetljivo hidravlično tekočino HFDU vrste. Za razliko od omenjenih testov, pa je test v vlažni komori pokazal, da ta vrsta ionske tekočine v prisotnosti vlage ne nudi praktično nikakršne zaščite pred korozijo. Razlog je po vsej verjetnosti higroskopnost ionske tekočine EMIM-EtSO₄. Zaradi slabih rezultatov korozijskega testa v vlažni komori smo z naslednjimi vzorci ionskih tekočin primarno žeeli izboljšati to lastnost. Določanje sposobnosti zaščite pred korozijo podrobnejše opisuje točka 5.

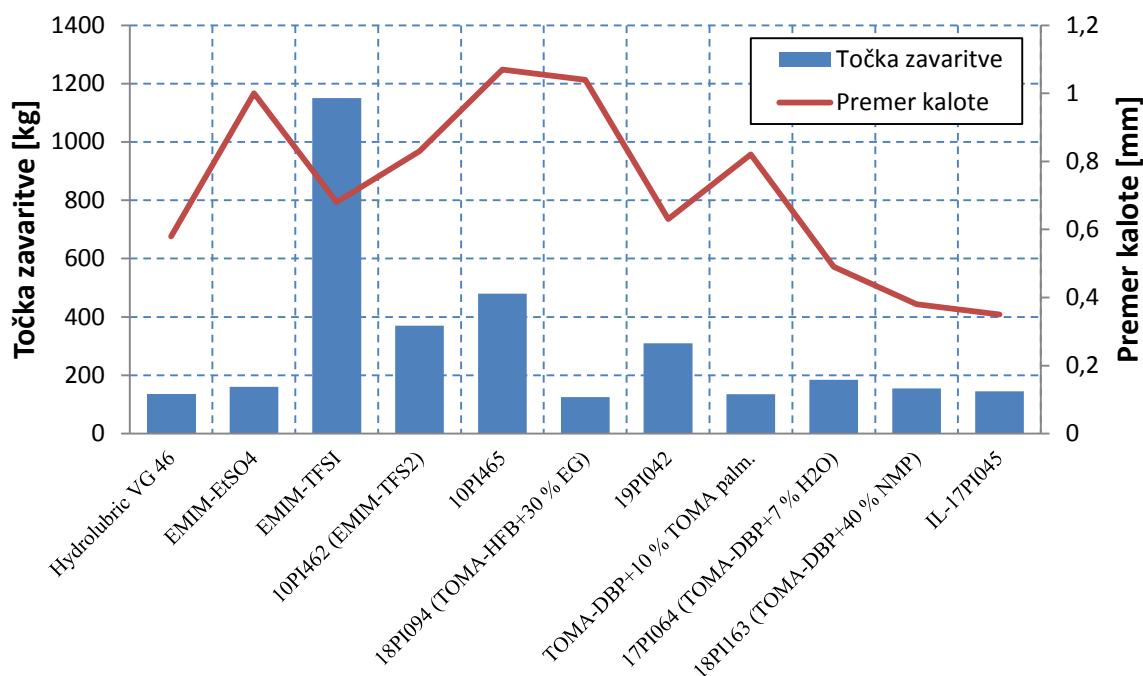
Preglednica 4.7: Rezultati primerjalnih meritev za EMIM-EtSO₄

Lastnost	Metoda	Vzorec	
		EMIM-EtSO ₄	Hydrolubric VG 46
Plamenišče	ASTM D 92 [°C]	230	224
Gostota/15°C	ISO 12185 [g/cm ³]	1,241	0,871
Viskoznost/40°C	ASTM D 445 [mm ² /s]	39,44	47,07
Viskoznost/100°C	ASTM D 445 [mm ² /s]	7,66	7,36
Indeks viskoznosti	ASTM D 2270 [-]	168	119
Nevtralizacijsko št.	ASTM D 974[mg KOH/g]	0,71	0,48
Mazalne lastnosti	IP 239 [kg]		
Točka zavaritve		140/180	130/140
Obrabna kalota	60 min/40 kg/ 75°C [mm]	1,0	0,58
Korozijski test			
Vlažna komora	DIN 51386 T1 [cycles]	0 (30 min)	0 (3 h)
Cu (3 h, 100°C)	ASTM D 130	1a	1a

Mazalne lastnosti nekaterih vzorcev ionskih tekočin so bistveno boljše kot pri mineralnem olju. Slika 4.28 prikazuje primerjavo točke zavaritve in premera obrabne kalote.

Nekateri vzorci imajo izredno visoko točko zavaritve, tako na primer EMIM-TFSI kar 1150 kg, kar nakazuje na izjemne lastnosti pri visokih tlakih (Extreme Pressure-EP lastnosti), vendar pa je zanimivo premer obrabne kalote celo večji kot pri mineralnem olju, kar pomeni, da so proti obrabne lastnosti (tako imenovane Anti-Wear-AW lastnosti) slabše. Ker so pri hidravličnih oljih pomembnejše AW lastnosti, bi bila ta tekočina potencialno bolj primerna za uporabo v zobniških prenosnikih, morda tudi kot hladilno mazalna tekočina pri obdelavi kovin. Pri ostalih tekočinah z visoko točko zavaritve je omejitev predvsem slaba zaščita pred

korozijo ob prisotnosti vlage ali pa neprimerna viskoznost za uporabo v hidravličnih sistemih (nekatere dodatne parametre prikazuje preglednica 5.1 v naslednji točki).



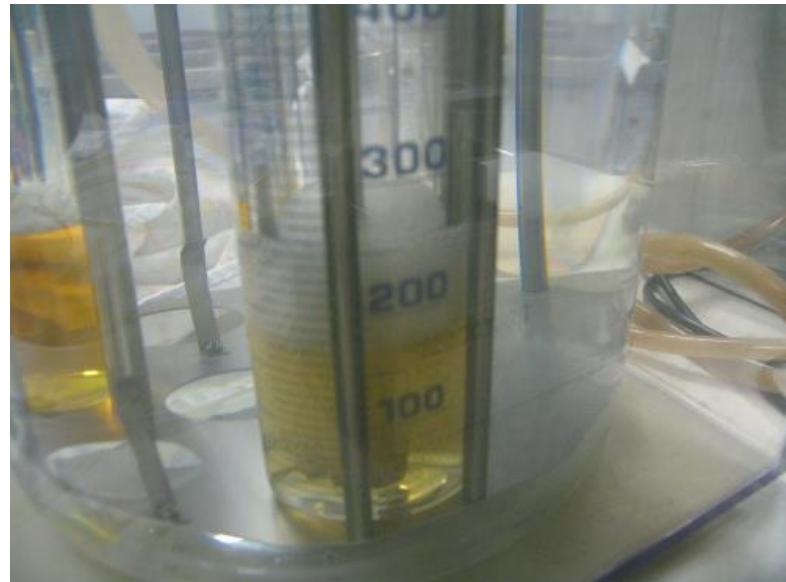
Slika 4.28: Mazalne lastnosti ionskih tekočin v primerjavi z mineralnim oljem

Nagnjenost k penjenju smo analizirali le pri nekaterih vzorcih ionskih tekočin, saj test zahteva večjo količino vzorca, ki ga nismo vedno imeli na voljo, poleg tega pa ta test ni imel pravega smisla, kadar smo že prej ugotovili, da zaradi kakšnih drugih pomanjkljivosti tekočina ni uporabna za naš namen. Standardni test penjenja obetajočega vzorca ionske tekočine IL-17PI045 smo opravili po standardu ASTM D 892. Testiranje smo izvedli v vseh 3 sekvencah. Rezultati so bili dobri, za razliko od prvega vzorca ionske tekočine EMIM EtSO₄ in vzorca ionske tekočine 17PI064 (TOMA-DBP+7% H₂O), kjer je bilo penjenje v sekvenci I izrazito močno. Rezultate prikazuje preglednica 4.8.

Preglednica 4.8: Primerjalni rezultati testa penjenja

	Metoda (Enota)	IL-17PI045	Hydrolubric VG 46, š. 7682 (12.08.2011)	TOMA-DBP +7 % H ₂ O	EMIM-EtSO ₄
Test penjenja	ASTM D 892				
Sekvenca I. (24°C); (ml/ml)		70/0	0/0	600/20	580/20
Sekvenca II. (93,5°C; (ml/ml))		0/0	30/0	/	/
Sekvenca III. (24°C); (ml/ml)		80/0	0/0	/	/

Pri testiranju vzorca IL-17PI045 v sekvencah I in III je bila po končanem vpihanjanju prisotna manjša količina pen, kot prikazuje slika 4.29. Pene pa so hitro izginjale in po 10 minutah niso bile več prisotne, kar prikazuje slika 4.30.



Slika 4.29: Test penjenja - sekvenca III po končanem vpihanjanju zraka



Slika 4.30: Test penjenja - sekvenca III, 10 min po končanem vpihanjanju zraka

Vzorec IL-17PI045 ima največ lastnosti v območju mineralnega hidravličnega olja in sicer viskoznost, indeks viskoznosti, korozijske lastnosti (preglednica 5.1), mazalne lastnosti (višja točka zavaritve in manjši premer obrabne kalote kot pri mineralnem olju; slika 4.28), dobe lastnosti penjenja in združljivost s sestavnimi deli hidravličnih sistemov (glej točko 5.4).

Med največji pomanjkljivosti spadata nizko vrelische in plamenišče (zaradi vsebnosti topila), poleg tega pa nezdružljivost z običajnimi barvnimi premazi rezervoarjev (glej točko 4.2.3), kar pomeni, da v praktični uporabi le ti ne bi smeli biti lakirani.

4.4 Ocena primernosti uporabljenih standardnih laboratorijskih metod za preizkušanje ionskih tekočin

Opisane metode preizkušanja, ki smo jih uporabili tudi za namene raziskave ionskih tekočin, so bile, kot že omenjeno, razvite večinoma za maziva na mineralni osnovi, saj le-ta dandanes predstavljajo okoli 90 % skupne porabe maziv. Seveda pa se lahko vprašamo ali in v kolikšni meri so te metode primerne tudi za preizkušanje ionskih tekočin. Dejstvo je, da celo za preizkušanje maziv na mineralni osnovi večkrat niso najbolj primerne oziroma realne. Uporabljamo pa jih, ker drugih, boljših metod trenutno nimamo, oziroma niso standardizirane.

Namenskih metod (kaj šele standardiziranih) za preizkušanje ionskih tekočin danes še ne poznamo, zato je uporaba obstoječih metod logična in smiselna. Ne glede na to, da ne obstajajo kriteriji za oceno primernosti standardnih laboratorijskih metod za testiranja ionskih tekočin, lahko sklepamo, da so večinoma primerne tudi za ionske tekočine. K temu sklepu nas navaja dejstvo, da so bile dosedanje raziskave ionskih tekočin opravljene večinoma po enakih metodah, pri čemer raziskovalci niso poročali o posebnih težavah, na katere bi naleteli pri svojem delu. Tudi pri našem raziskovalnem delu je bilo podobno, saj z nekaterimi izjemami, ki jih navajam v nadaljevanju, nismo imeli težav. Vsekakor pa dobljeni rezultati lahko služijo le kot smernica, nikakor pa ne absolutno merilo za oceno uporabnosti ionskih tekočin v praksi. Prav zato smo opravili tudi nekaj nestandardnih praktičnih testov, ki imajo verjetno celo večjo težo kot nekatere standardne laboratorijske meritve.

Pri uporabi standardnih metod določanja kinematične viskoznosti in plamenišča smo imeli težave v primerih ionskih tekočin z vsebnostjo vode ali topila. V tem primeru je tekočina običajno začela vreti pri temperaturi okoli 100 °C. Zato je bilo določanje kinematične viskoznosti pri 100 °C in indeksa viskoznosti oteženo ali nemogoče. Podobno velja tudi za določanje plamenišča.

Zaradi slabše sposobnosti zaščite pred korozijo pri večini testiranih ionskih tekočin (glej točko 5) smo se preventivno odrekli nekaterim testom (na primer standardnemu postopku določanja stopnje čistosti ionskih tekočin z avtomatskim števcem delcev po metodi ISO 4406, meritvam Stribeckove krivulje pri višjih temperaturah), čeprav so pomembni in široko uporabljeni za testiranje hidravličnih tekočin. V nekaterih primerih pa smo pri testiranjih

ionskih tekočin povzročili škodo (korozijo) na preizkusni opremi, kot opisuje na primer točka 6.8.2.

Zato je seveda vmesen razmislek o modifikaciji nekaterih standardiziranih metod preizkušanja maziv v smeri večje primernosti za ionske tekočine. V zvezi z omenjenim določanjem stopnje čistosti obstaja možnost uporabe avtomatskih števcev delcev, ki imajo nerjavne sestavne dele in so primerni za testiranje agresivnih tekočin (na primer težko vnetljive hidravlične tekočine na osnovi fosfatnih estrov), ki bi bili verjetno primerni tudi za določanje stopnje čistosti ionskih tekočin po standardu ISO 4406. Z uporabo nerjavnih materialov bi najverjetneje lahko tudi nekatere druge testne metode naredili bolj uporabne za testiranje ionskih tekočin.

Potreбно bo modificirati standardizirano metodo za določanje sposobnosti filtracije po ISO 13357 ali pa določiti novo metodo. Že v samem standardu je namreč omenjeno, da metoda zaradi nezdružljivosti s testnimi filtrskimi membranami, načeloma ni uporabna za druge tekočine, temveč le za tekočine na mineralni osnovi. To se je pri testiranju ionskih tekočin IL-17PI045 in EMIM-EtSO₄ izkazalo za resnično. Ocene sposobnosti filtracije omenjenih ionskih tekočin zato ne moremo podati. Za testiranje ionskih tekočin je ta metoda neprimerna. Celo v primeru hidravličnih olj na mineralni osnovi se lahko vprašamo, zakaj je predvidena uporaba celuloznih filtrskih elementov, saj vemo, da se ti v hidravličnih sistemih uporabljam redko.

5 DOLOČANJE SPOSOBNOSTI ZAŠČITE PRED KOROZIJO

Glede na to, da so ionske tekočine soli, smo pričakovali, da bo sposobnost zaščite pred korozijo eden od tistih parametrov, pri katerem se bo najtežje približati lastnostim konvencionalnih hidravličnih tekočin, še zlasti olj na mineralni osnovi. To se je pri laboratorijskih testiranjih potrdilo, predvsem pri korozijskih testih v vlažni komori, kjer se je večina testiranih ionskih tekočin izkazala bistveno slabše kot mineralno hidravlično olje. Ta test se pri preizkušanju hidravličnih tekočin sicer uporablja redkeje, je pa zelo uporaben za hitro oceno, ker se zaradi zaostrenih pogojev čas do nastopa korozije zelo skrajša. Poleg tega smo sposobnost zaščite pred korozijo določali tudi s standardno metodo določanja korozivnosti na baker in interno metodo določanja korozije na zraku.

5.1 Korozijski test v vlažni komori

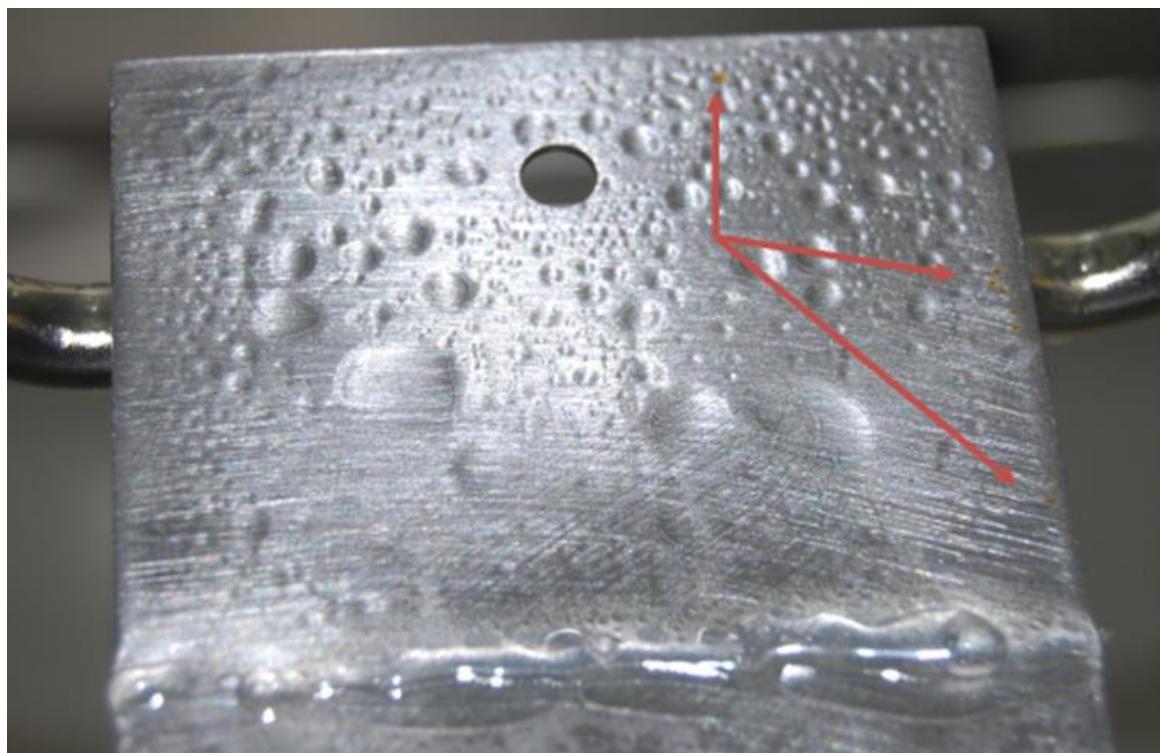
Sposobnost zaščite pred korozijo v vlažni komori smo določali po metodi, opisani v točki 4.1.6. Meritve smo opravljali pri konstantni atmosferi, do pojava prvih znakov korozije, včasih pa zaradi pridobitve dodatnih informacij tudi po tem.

Testirali smo več kot 20 različnih vzorcev ionskih tekočin. Preglednica 5.1 prikazuje primerjavo časov do nastopa korozije le nekaterih od njih, primerjalno z mineralnim hidravličnim oljem Hydrolubric VG 46 in težko vnetljivo hidravlično tekočino Quintolubric 888-68 (HFDU vrsta). Dobre lastnosti testiranih vzorcev so označene zeleno, slabe pa rdeče. Vidimo, da korozijnska zaščita v večini primerov ne znaša niti 1 ciklus (24 ur). V tem primeru je v oklepaju naveden čas v minutah ali urah do nastopa prvih znakov korozije. V večini primerov je korozijnska zaščita v primerjavi z mineralnim hidravličnim oljem slabša, še zlasti pa v primerjavi s težko vnetljivo hidravlično tekočino, kjer je sposobnost zaščite pred korozijo izjemna in znaša 7 ciklusov, kar je že primerljivo z namenskimi sredstvi za zaščito pred korozijo. V redkih primerih pa je sposobnost zaščite pred korozijo primerljiva ali celo boljša kot pri mineralnem hidravličnem olju, tako kot to vidimo pri zadnjih treh vzorcih v tabeli. Glede na viskoznost, ki je primerna za uporabo v večini hidravličnih sistemov, sta torej zanimiva predvsem zadnja dva vzorca. Slika 5.1 prikazuje vzorec 18PI163 (TOMA-DBP+40 % NMP) 3,5 h po začetku testa v vlažni komori, ko so se pojavili prvi znaki korozije [69]. Slika 5.2 pa prikazuje ta vzorec primerjalno z vzorcem mineralnega hidravličnega olja Hydrolubric VG 46 po 24 urah (1 ciklus) od začetka testa.

Preglednica 5.1: Primerjava nekaterih fizikalno kemijskih lastnosti

Lastnost	Viskoznost 40 °C	Indeks viskoznosti ASTM D 445	Točka zavaritve ASTM D 2270	Obrabna kalota IP 239	Korozija v vlažni komori DIN 51306-1
Metoda					
Enota	[mm ² /s]	[/]	[kg]	[mm]	[ciklusi]
Vzorec					
Hydrolubric VG 46, š. 7698	47,07	119	130/140	0,58	0 (3 h)
Quintolubric 888-68, š. 335004	66,8	/	/	/	7
EMIM-EtSO ₄	39,44	168	140/180	1,0	0 (15 min)
EMIM-TFSI	71,89	132	1100/1200	0,68	0 (1,5 h)
10PI 453-1	/	/	/	/	0 (5 h)
10PI 453-2	/	/	/	/	0 (1 h)
10PI 453-3	/	/	/	/	0 (1 h)
10PI 453-4	/	/	/	/	0 (30 min)
10PI 453-5	/	/	/	/	0 (45 min)
10PI462 (EMIM-TFS2)	/	/	360/380	0,83	0 (30 min)
10PI465	/	/	>480	1,07	0 (30 min)
16PI028-5 (TOMA-DBP)	/	/	/	/	0 (30 min)
10PI028-3 (TOMA-HFB)	/	/	/	/	0 (45 min)
16PI062-2 (TOMA-DBP)	59,14	/	160/170	/	0 (4 h)
16PI062-1 (TOMA-HFB)	61,46	/	110/120	/	0 (5 min)
18PI094 (TOMA-HFB+30 % EG)	49,28	109	120/130	1,04	0 (15 min)
19PI042	193,30	116	300/320	0,63	0 (15 min)
TOMA-DBP+10 % TOMA palm.	60,29	133	130/140	0,82	0 (2,5 h)
EMIM-SCN+42,3 % TOMP-DBP	/	/	>200	/	0 (15 min)
17PI064 (TOMA-DBP+7 % H ₂ O)	102,90	105	180/190	0,49	1
18PI163 (TOMA-DBP+40 % NMP)	47,36	155	150/160	0,38	0 (3,5 h)
IL-17PI045	46,59	155	140/150	0,35	0-1 (>7,5 h)

Kot prikazuje slika 5.2 se razmere pri vzorcu ionske tekočine tudi v naslednjih urah po pojavu prvih znakov korozije niso bistveno poslabšale in lahko ugotovimo, da ima ta vzorec celo nekoliko boljšo sposobnost zaščite pred korozijo kot mineralno hidravlično olje.



Slika 5.1: Test v vlažni komori po 3,5 h; 18PI163 (TOMA-DBP+40 % NMP)



Hydrolubric VG 46

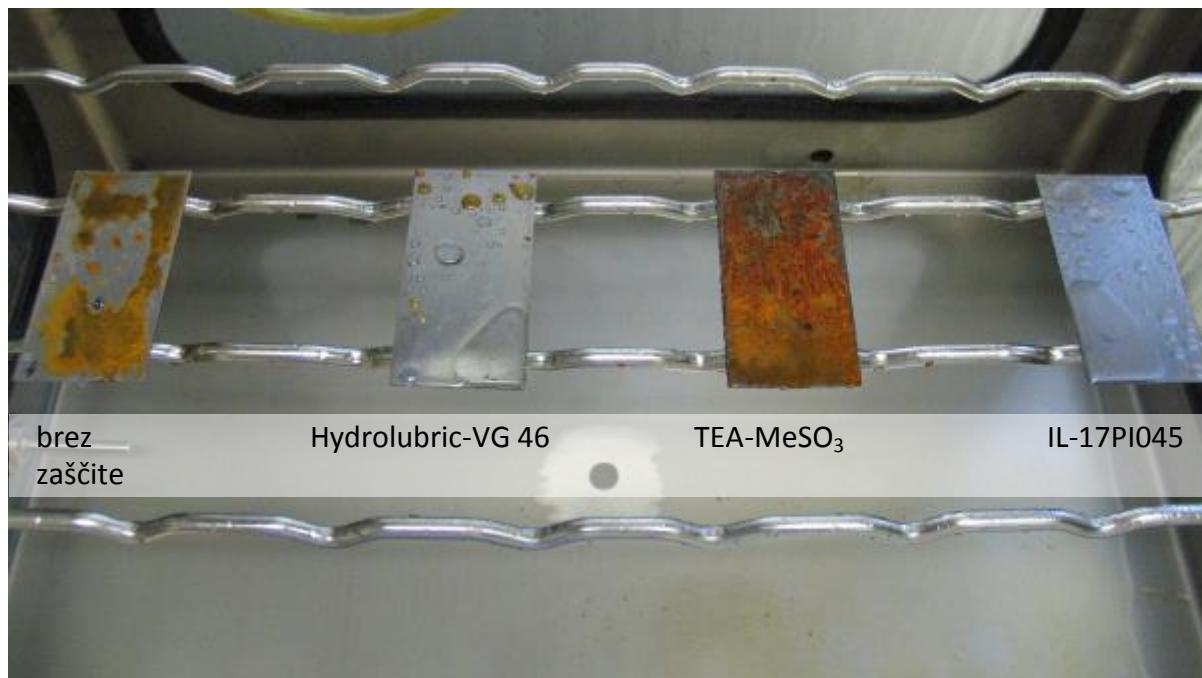
18PI163 (TOMA-DBP+40 % NMP)

Slika 5.2: Test v vlažni komori po 24,5 h; 18PI163 (TOMA-DBP+40 % NMP)

Ker vzorec 18PI163 (TOMA-DBP+40 % NMP) vsebuje relativno visok delež topila, ki je potrebno zaradi doseganja želene viskoznostne gradacije ISO VG 46, je posledično

plamenišče ($112\text{ }^{\circ}\text{C}$ v odprti, $86\text{ }^{\circ}\text{C}$ v zaprti posodi) in vrelišče vzorca relativno nizko. Zato smo z modifikacijo tega vzorca in zmanjšanjem vsebnosti topila žeeli popraviti te parametre.

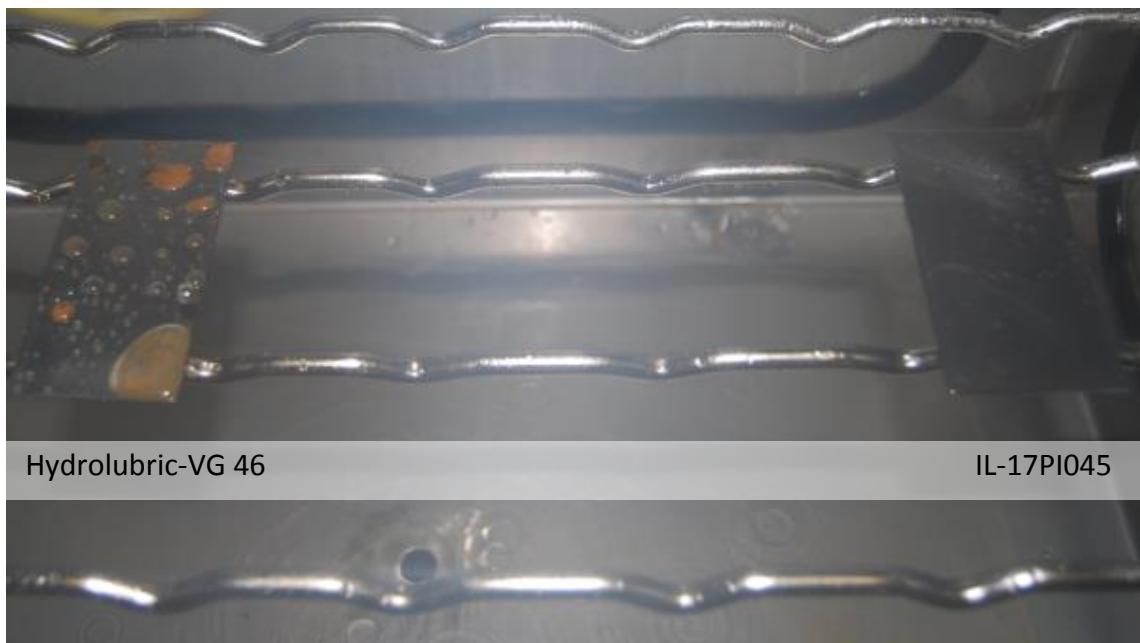
Iz podatkov, ki jih prikazuje preglednica 5.1 vidimo, da se z omenjeno modifikacijo sposobnost zaščite pred korozijo pri vzorcu IL-17PI045 ni poslabšala. To potrjuje tudi slika 5.3, ki prikazuje stanje tega vzorca primerjalno še z nekaterimi drugimi vzorci, med njimi tudi mineralnim hidravličnim oljem po 24 h od začetka testa. Tedaj so bili tudi na pločevini, zaščiteni z vzorcem IL-17PI045 že prisotni prvi znaki korozije.



Slika 5.3: Test v vlažni komori po 24 h; IL-17PI045

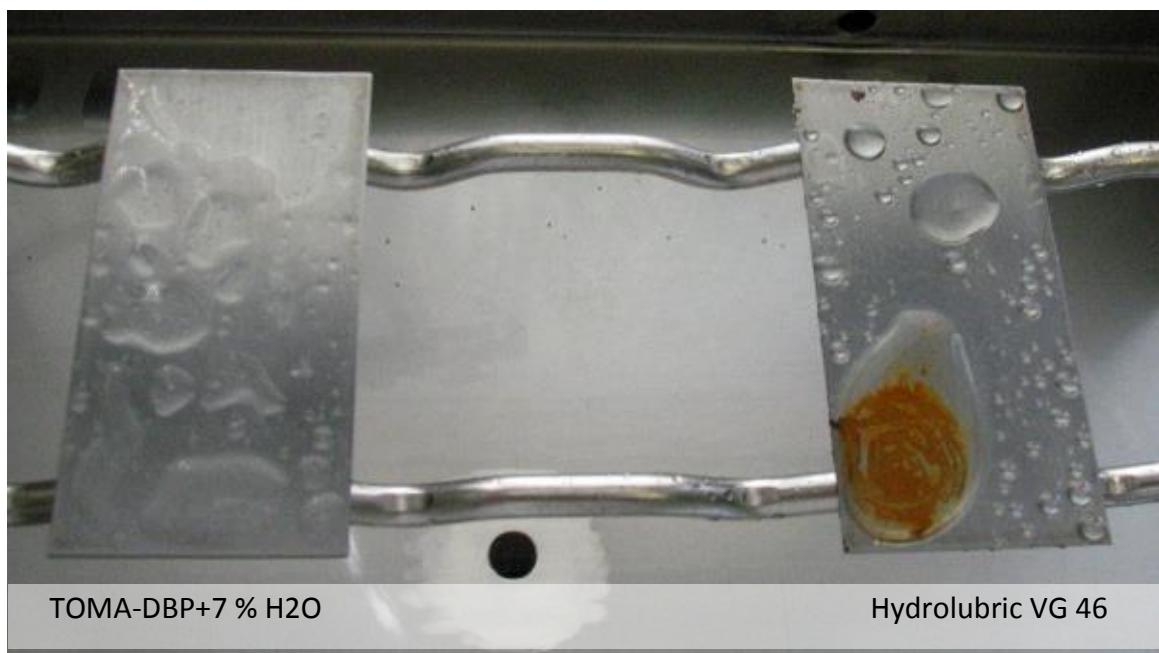
Iz primerjave, ki jo prikazuje slika 5.4, lahko ugotovimo, da se tudi v naslednjih dneh stanje vzorca ionske tekočine IL-17PI045 ni bistveno poslabšalo in se je tudi tokrat vzorec ionske tekočine izkazal celo bolje kot mineralno olje. Z znižanjem vsebnosti topila smo uspeli dvigniti tudi plamenišče v odprti posodi na $138\text{ }^{\circ}\text{C}$ in zaprti posodi na $98\text{ }^{\circ}\text{C}$ ter vrelišče na približno $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Še vedno pa to niso rezultati, ki bi si jih žeeli. Želeli bi si seveda plamenišče vsaj v rangu mineralnih hidravličnih olj ($>200\text{ }^{\circ}\text{C}$), če ne celo težko vnetljivih hidravličnih tekočin.

Kot vidimo iz podatkov, ki jih prikazuje preglednica 5.1, smo najboljše rezultate pri testu korozije v vlažni komori od vseh ionskih tekočin izmerili pri vzorcu 17PI064 (TOMA-DBP+7 % H₂O), ki je edini nudil zaščito pred korozijo 1 ciklus (24 ur), oziroma celo nekoliko dlje.



Slika 5.4: Test v vlažni komori po 4 dneh; IL-17PI045

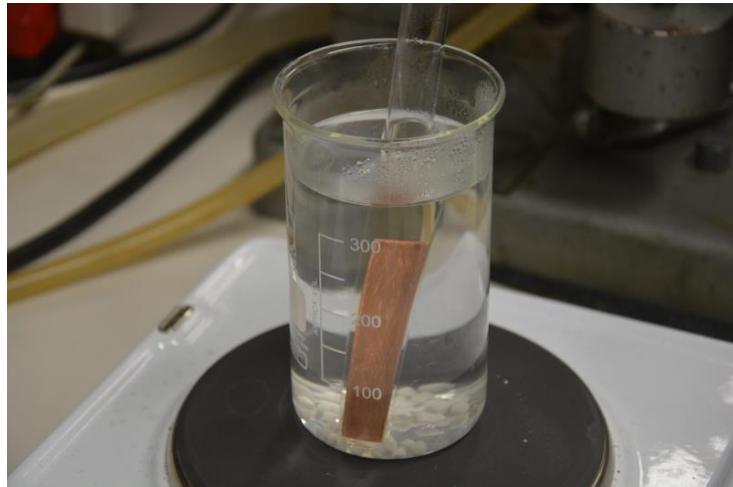
Tudi v tem primeru je korozijska zaščita v vlažni komori boljša kot pri mineralnem olju, kar prikazuje slika 5.5. Prvi znaki korozije so se pojavili šele med prvim in drugim ciklusom, stanje pa se tudi v naslednjih dneh ni bistveno poslabšalo. Vendar pa je viskoznost tega vzorca za večino hidravličnih sistemov previsoka, zato dodatnih raziskav nismo opravljali.



Slika 5.5: Test v vlažni komori po 27 h; 17PI064 (TOMA-DBP+7 % H₂O)

5.2 Korozivnost na baker

Zaradi prisotnosti barvnih kovin na osnovi bakra v hidravličnih sestavinah smo opravili tudi test korozivnosti na baker. Test smo opravili po standardu ASTM D 130, po postopku, opisanem v točki 4.1.7, kjer smo vzorca ionske tekočine IL-17PI045 in EMIM-EtSO₄ segrevali 3 ure pri temperaturi 100 °C. Postopek prikazuje slika 5.6.



Slika 5.6: Izvajanje testa korozivnosti na baker

Po končanem segrevanju smo videz bakrene ploščice primerjali z etalonom, kar prikazuje slika 5.7. Vidnih sprememb barve ni bilo, kar pomeni, da je rezultat tega testa 1a. Obe ionski tekočini sta torej združljivi tudi z materiali, ki vsebujejo baker.



Slika 5.7: Določanje korozivnosti na baker za IL-17PI045

5.3 Korozija na zraku

V tem primeru smo opravili nestandardni, interni (=lastni) test. Uporabili smo enake jeklene ploščice, kot jih uporabljam pri določevanju korozije v vlažni komori, ki je opisana v točki 4.1.6. Tudi priprava ploščice je bila enaka. Nato smo ploščico premazali z vzorcem ionske tekočine in v nadaljevanju testa pri sobnih pogojih opazovali morebitne spremembe videza površine. V primeru mineralnega hidravličnega olja se korozija na zraku ni pojavila niti po daljšem časovnem obdobju (>60 dni), pri nekaterih ionskih tekočinah pa se je pojavila že po 2 do 3 dneh. Slika 5.8 prikazuje stanje po 4 dneh od začetka testa. Vidimo, da je stanje slabše na spodnjem delu ploščice, kjer je bil sloj ionske tekočine zaradi neravne podlage nekoliko debelejši.



Slika 5.8: Test korozije na zraku EMIM-EtSO₄ po 4 dneh

V primeru, ko smo kovinsko ploščico po premazu z ionsko tekočino IL-17PI045 pustili na zraku pri sobni temperaturi, se korozija ni pojavila niti po 3 mesecih od začetka testa. Testiranje te tekočine na zraku smo zato po 3 mesecih prekinili.

5.4 Združljivost s sestavnimi deli hidravličnih sistemov

Poleg standardnih testov sposobnosti zaščite pred korozijo v vlažni komori, korozivnosti na baker in internega testa korozije na zraku, opisanih v predhodnih točkah, smo

opravili tudi interni (=lastni) test združljivosti ionskih tekočin IL-17PI045 in EMIM-EtSO₄ z različnimi sestavnimi deli hidravličnih ventilov, ki so, kot je poznano, najbolj vitalni deli hidravličnih sistemov. Namen je bil preizkusiti vpliv obeh ionskih tekočin na sestavne dele realnih hidravličnih sistemov.

5.4.1 Vrsta in material uporabljenih sestavnih delov

Za namen tega testa smo pridobili originalne sestavne dele priznanega proizvajalca hidravlične opreme Poclain hydraulics d.o.o. Omenjene sestavne dele prikazuje slika 5.9. Uporabili smo naslednje dele:

- bat potnega ventila iz jekla 10715, cementiran 0,4 mm in kaljen na 58-62 HRC (slika 5.9, pozicija 1),
- vzman iz jeklene vzmanetne žice po DIN 17223-1 (slika 5.9, pozicija 2),
- podložka iz jekla DC01 (slika 5.9, pozicija 3),
- vijak iz jekla 10715 brez naknadne toplotne obdelave (slika 5.9, pozicija 4),
- ohišje ventila iz sive litine GG30, DIN 1691, žarjeno za odpravo notranjih napetosti (slika 5.9, pozicija 5),
- ohišje ventila iz jekla 10718, vrtano iz celega (slika 5.9, pozicija 6),
- ohišje ventila iz jekla Hyt 60[®] (slika 5.9, pozicija 7),
- bat RTB 15 iz jekla 16MnCr5 (slika 5.9, pozicija 8),
- ohišje bata RTB 15 iz jekla 42CrMo4 brez naknadne toplotne obdelave (slika 5.9, pozicija 9),
- bat VE 60 iz jekla 16MnCr5, cementiran (slika 5.9, pozicija 10).

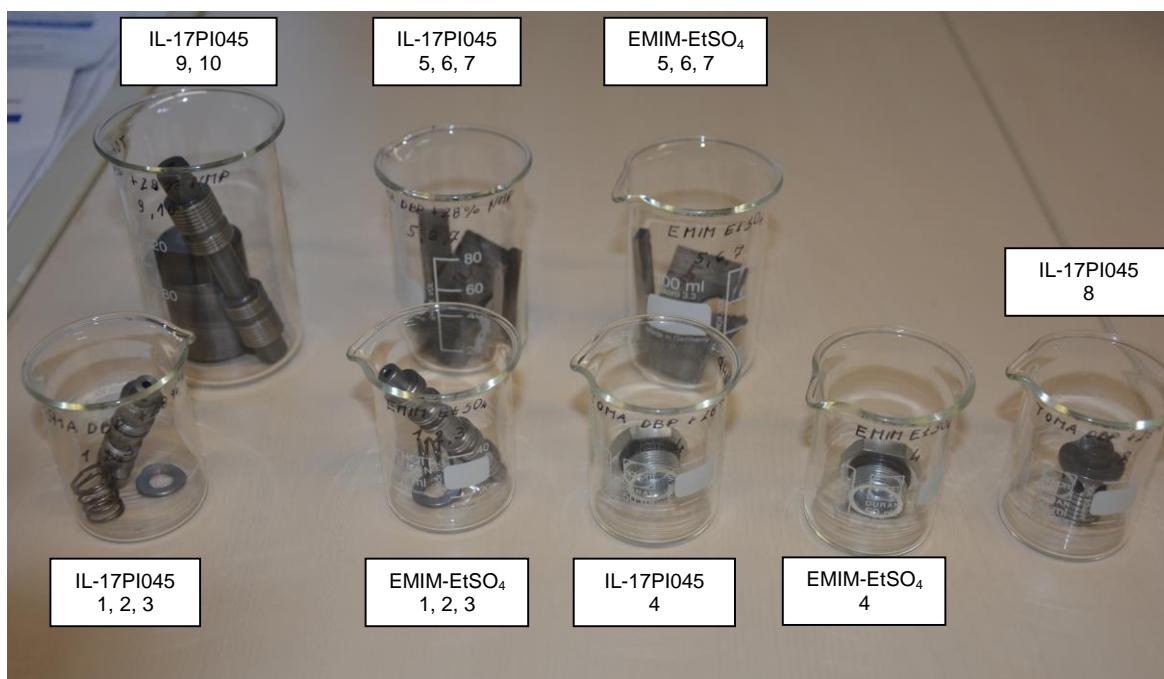


Slika 5.9: Vzorci delov hidravličnih ventilov

5.4.2 Način izvedbe testa

Sestavnih delov pred začetkom testa nismo posebej pripravljali, ampak smo jih uporabili takšne, kot jih dobavlja proizvajalec. Po končani izdelavi jih je ta zaščitil z nizko viskoznim oljem za protikorozjsko zaščito. Uporabili smo jih torej v takšnem stanju, kot se tudi sicer uporablja v praksi. Izjema so vsa tri ohišja ventila, iz katerih smo, zaradi omejene količine obeh ionskih tekočin, z žago odrezali manjše vzorce.

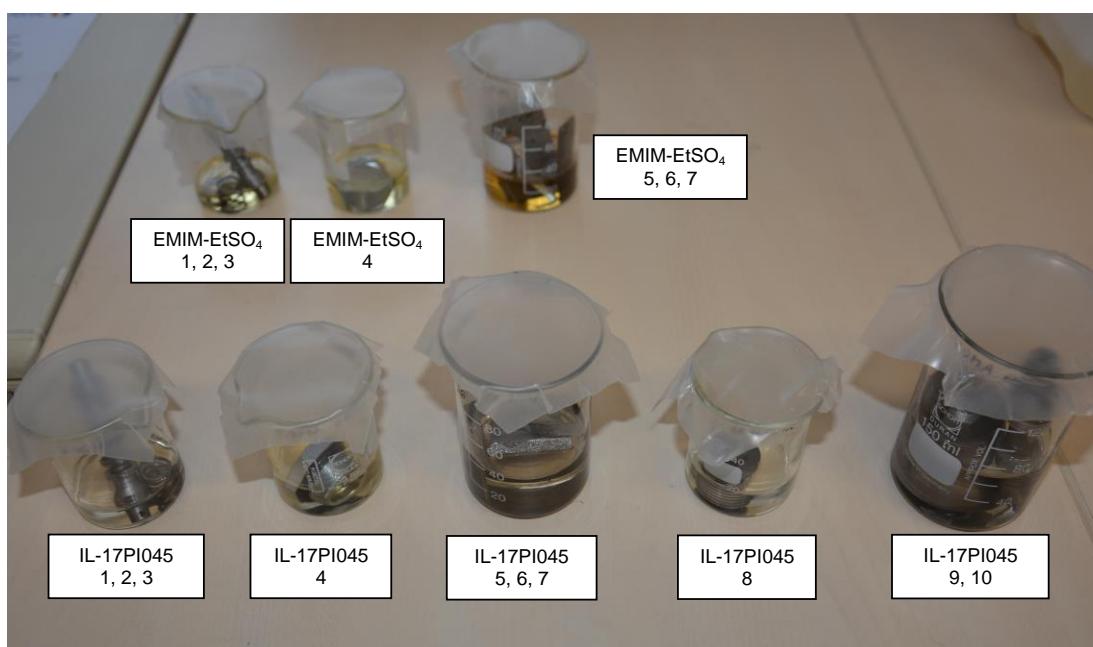
Test združljivosti smo opravili tako, da smo različne sestavne dele omočili in trajno potapljali v vzorcih ionskih tekočin EMIM-EtSO₄ in IL-17PI045. Zaradi omejene količine vzorcev ionskih tekočin smo nekatere sestavne dele namakali v isti stekleni časi. Tako smo združili pozicije 1, 2 in 3, ki jih prikazuje slika 5.9, prav tako pozicije 5, 6 in 7 ter poziciji 9 in 10. V tekočini EMIM-EtSO₄ smo namakali pozicije 1, 2, 3, 4, 5, 6 in 7 ne pa pozicij 8, 9 in 10 (na razpolago le po 1 kos). V tekočini IL-17PI045 pa smo namakali vse pozicije od 1 do 10. Steklene čase s testiranimi sestavnimi deli pred začetkom testa prikazuje slika 5.10.



Slika 5.10: Vzorci hidravličnih ventilov pred začetkom namakanja

V vsako čašo smo nalili 10 do 30 ml ionske tekočine. Natančna količina ni pomembna, naliili smo je toliko, da so bili testni vzorci delno potopljeni, delno pa nad gladino. Sestavne dele smo najprej popolnoma omočili z ionsko tekočino, nato pa postavili v pokončno lego, da je bil spodnji del popolnoma potopljen, ostali del nad gladino pa v času testiranja izpostavljen vplivu sobne atmosfere (izjema je bila podložka, ki je bila popolnoma potopljena).

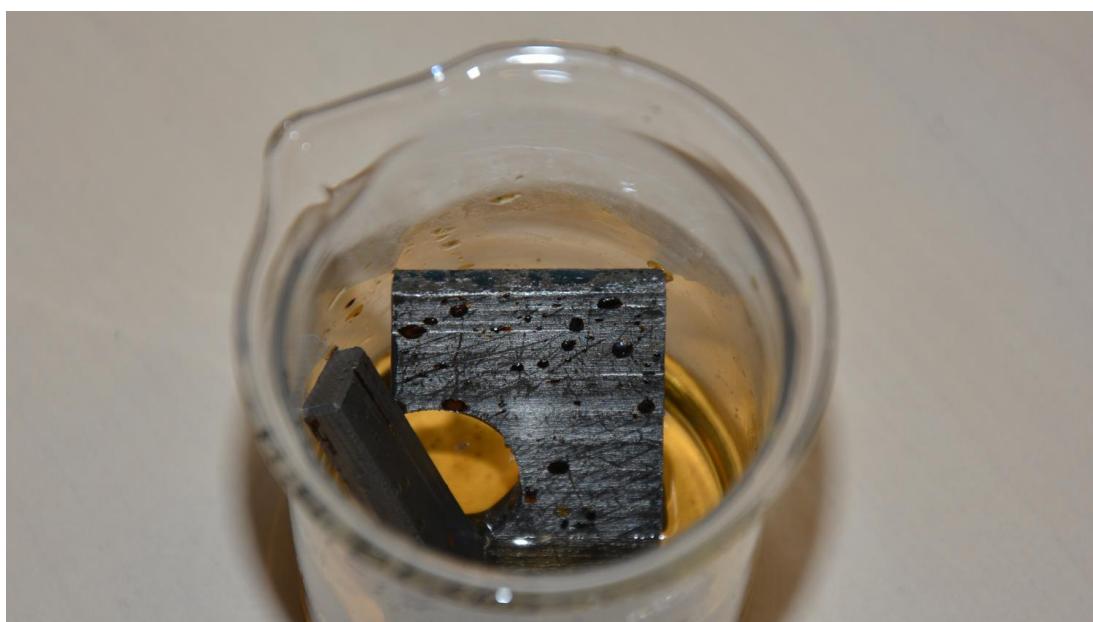
Slika 5.11 prikazuje stanje med izvajanjem testa združljivosti.



Slika 5.11: Vzorci hidravličnih ventilov med testom združljivosti z ionsko tekočino

5.4.3 Ocena združljivosti

Test je pokazal združljivost sestavnih delov hidravličnih ventilov z obema ionskima tekočinama. V nekaj mesečnem testnem obdobju namreč nismo opazili sprememb površine sestavnih delov. To nas je presenetilo predvsem pri ionski tekočini EMIM-EtSO₄, ki tako pri koroziskem testu v vlažni komori, predvsem pa tudi pri testu korozije na zraku ni pokazala dobre zaščite pred korozijo. Možen razlog je ta, da so bili v tem primeru sestavni deli predhodno zaščiteni z namenskim sredstvom za zaščito pred korozijo. Na poziciji 5, ki smo jo odžagali iz ohišja ventila in na odžaganji površini ni bila zaščitena, so se pri EMIM-EtSO₄ namreč po približno 90 dneh pojavili prvi znaki korozije, kar prikazuje slika 5.12.



Slika 5.12: Test namakanja v EMIM-EtSO₄ po 90 dneh; pozicija 5

Glede na rezultate testa združljivosti pri praktični uporabi obeh ionskih tekočin v hidravličnem sistemu ni pričakovati težav s korozijo, vsaj dokler ne bi bila v sistemu prisotna voda.

6 MERJENJE STISLJIVOSTI HIDRAVLIČNIH TEKOČIN

Kljub množično uporabljeni predpostavki, da so hidravlične tekočine nestisljive, še vedno ostaja dejstvo, da so vse tekočine stisljive. Stisljivost lahko zanemarimo v sistemih, ki ne potrebujejo natančne regulacije ter tam, kjer je količina hidravlične tekočine majhna. Kadar pa izpostavimo veliko količino tekočine visokemu tlaku, potrošimo veliko energije za stiskanje tekočine - tiščanje molekul še bliže skupaj.

Rezultat takšnega stiskanja je zakasnen odziv - obremenjen aktuator se ne premakne, dokler ni vsa tekočina med ventilom in aktuatorjem stisnjena. Energija, ki je shranjena v tekočini, pa povzroči premike aktuatorja tudi po izklopu ventila - ko se tekočina razteza. Z zanemarjanjem stisljivosti tekočine pri preračunu regulatorjev v hidravličnih agregatih, ki delujejo pri tlakih večjih od 300 bar, lahko zmanjšamo odzivni čas in natančnost hidravličnega sistema. Kljub temu pa še vedno velja pravilo, da naj bo količina tekočine med ventilom in aktuatorjem čim manjša.

Za lažjo predstavo o tem, kaj je stisljivost, se moramo seznaniti z modulom stisljivosti. Modul stisljivosti nam pove, za koliko se zmanjša tlak v tekočini, če jo »raztegnemo« za 100 %, pri tem pa se temperatura tekočine ne spremeni, kar prikazuje enačba (6.1).

$$\Delta p = -K \frac{\Delta V}{V_0} \quad (6.1)$$

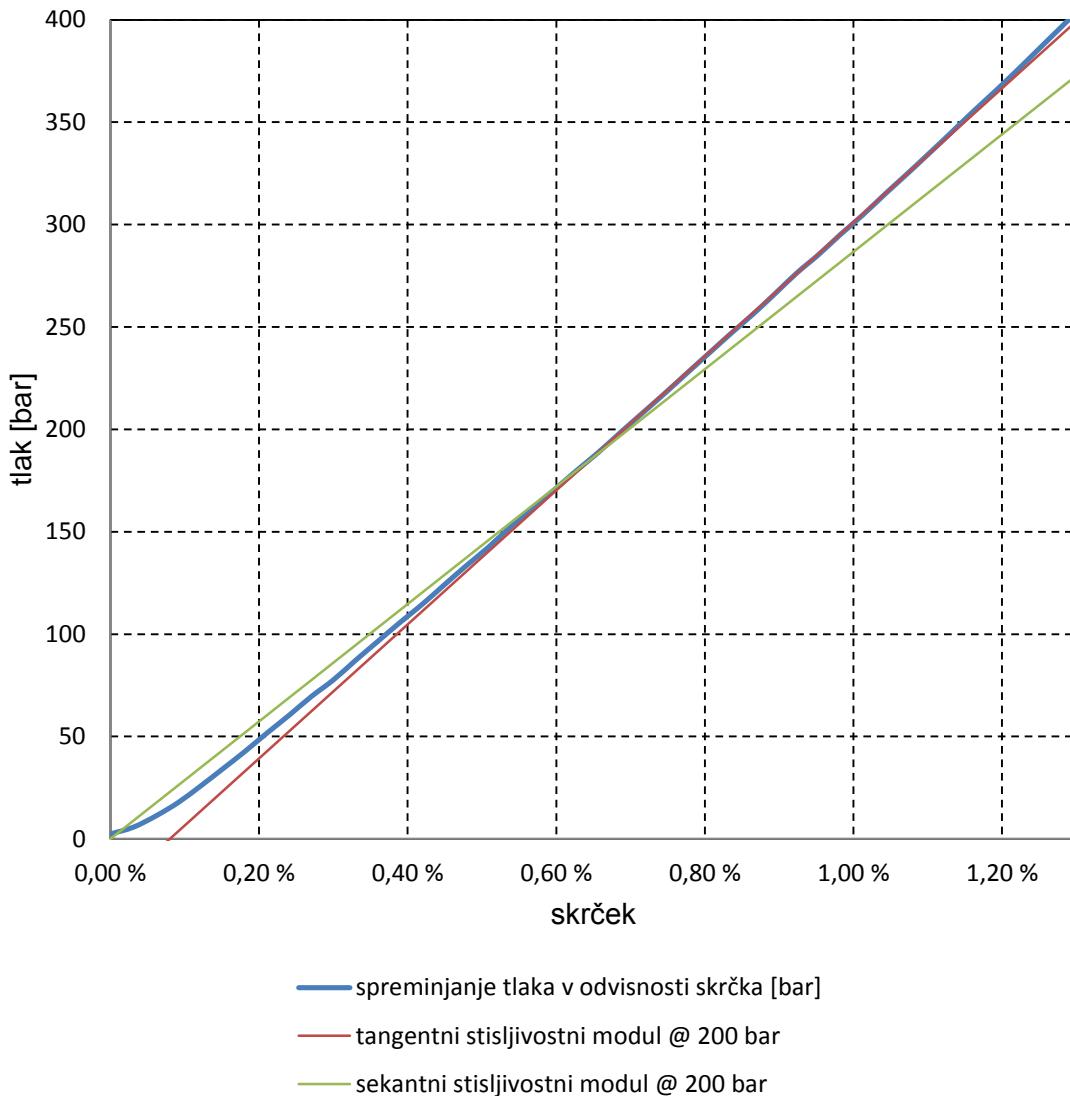
K [Pa] – modul stisljivosti

Δp [Pa] – sprememba tlaka

ΔV [ml] – sprememba volumna

V_0 [ml] – začetni volumen tekočine

Modul stisljivosti je najpogosteje prikazan kot strmina krivulje v grafu tlaka v odvisnosti od raztezka, kar prikazuje slika 6.1. Strmino v grafu navadno določamo z izračunom tangente v želeni točki. Na tak način dobimo tangentni modul stisljivosti, ki se v literaturi označuje kar kot modul stisljivosti. Strmino lahko v dani točki določimo tudi s sekanto. S to metodo lineariziramo začetni del grafa, tako dobljeno vrednost pa imenujemo sekantni modul stisljivosti.



Slika 6.1: Graf tlaka v odvisnosti od skrčka

Večja kot je strmina, bolj toga je tekočina - njena stisljivost je manjša. Manjša kot je strmina, manj toga je tekočina - bolj je stisljiva. Z logičnim razmislekom lahko pridemo do definicije stisljivosti, ki je po enačbi (6.2) definirana kot recipročna vrednost modula stisljivosti.

$$\chi = \frac{1}{K} \quad (6.2)$$

χ [Pa⁻¹] – stisljivost

Lahko bi rekli, da nam stisljivost, nasprotno od modula stisljivosti, pove, za koliko odstotkov se zmanjša volumen tekočine, če jo izpostavimo tlaku 1 Pa (6.3).

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\chi \cdot \Delta p \quad (6.3)$$

Na spremembo volumna tekočina reagira tudi s spremembo temperature. Vsaka sprememba tlaka ali temperature pomeni spremembo prostornine, ki je odvisna od velikosti spremembe in vrste tekočine. Obe vrsti spremembe lahko zapišemo v obliki totalnega diferenciala prostornine z enačbo (6.4)

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T dp \quad (6.4)$$

Enačbo (6.4) lahko izrazimo na enoto prostornine (stisljivost) z enačbo (6.5) .

$$\frac{dV}{V_0} = \frac{1}{V_0} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dT + \frac{1}{V_0} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T dp = -\chi \quad (6.5)$$

Če predpostavimo, da se tekočina zaradi stiskanja ne segreje - vsa temperatura se idealno odvede v okolico, in tako je temperatura prostora med meritvijo konstantna, lahko spremembo volumna tekočine, ki nastane zaradi spremembe temperature, zanemarimo. Poenostavljen totalni diferencial prostornine izražen na enoto prostornine tako lahko zapišemo z enačbo (6.6).

$$\chi = -\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dp} \quad (6.6)$$

Modul stisljivosti, kot recipročno vrednost stisljivosti, lahko tako zapišemo z enačbo (6.7).

$$K = \frac{1}{\chi} = -V_0 \frac{dp}{dV} \quad (6.7)$$

Za vrednost modula stisljivosti, npr. za področje hidravlične pogonske tehnike najpogosteje uporabljana mineralna olja K_{olje} (brez vključkov zraka), pri uporabi v področju

običajnih temperatur in tlakov ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 100 bar do 200 bar), se lahko dovolj natančno uporabi kar približna, konstantna vrednost, ki znaša okvirno okoli $K_{olje} \approx 1,66 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ (1660 MPa, $\sim 1,66 \cdot 10^4$ bar). Vrednost je seveda odvisna od vrste baznega olja, uporabljeni aditivi pa na vrednost nimajo velikega vpliva. V primerjavi z modulom elastičnosti za jeklo $E_{jeklo} \approx 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$, je torej mineralno olje veliko bolj stisljivo in sicer kar 130-krat bolj.

6.1 Vpliv stisljivosti na delovanje hidravličnega sistema

Predpostavka, da je hidravlična tekočina nestisljiva, je za preračun tlakov, tlačnih izgub, učinka sil in za statični način obravnave tekočine zadovoljiva. Na hidravličnih napravah pa so prisotni pojavi, ki si jih lahko razložimo samo na osnovi stisljivosti tekočine [70].

V hidravličnem sistemu tekočina ni edina sestavina, katere elastičnost/stisljivost je odvisna od obremenitve. Bolj ali manj elastično strukturo imajo namreč vse hidravlične sestavine (npr. jeklene oz. še posebej gibke cevi). Zato se je kot zelo praktična izkazala uvedba nadomestnega modula stisljivosti npr. mineralnega olja K'_{olje} , ki ne upošteva samo stisljivosti olja in elastičnosti cevi, v kateri se olje nahaja, temveč tudi v olju prisotne zračne mehurčke. Enačbo (6.7) lahko z upoštevanjem vseh teh deležev preoblikujemo in dobimo enačbo (6.8) oziroma enačbo (6.9).

$$\Delta V_{cel} = \Delta V_{olje} + \Delta V_{cev} + \Delta V_{zrak} = -V_0 \frac{\Delta p}{K'_{olje}} \quad (6.8)$$

ΔV_{cel} [m³] – celotna sprememba volumna zaradi elastičnosti hidravličnih sestavin

ΔV_{olje} [m³] – sprememba volumna olja

ΔV_{cev} [m³] – sprememba volumna tekočine v priključnih ceveh

ΔV_{zrak} [m³] – sprememba volumna zaradi prisotnih zračnih mehurčkov

K'_{olje} [Pa] – nadomestni modul stisljivosti olja

$$K'_{olje} = -\frac{V_0 \cdot \Delta p}{\Delta V_{cel}} \quad (6.9)$$

Čeprav obstajajo različne enačbe za preračun nadomestnega modula stisljivosti K'_{olje} , se njegova vrednost najpogosteje določa z eksperimentom, kajti vrednost se spreminja v odvisnosti od stanja sistema, npr. tudi od tega ali je bil hidravlični sistem dobro ali slabo odzračen. Enačbo (6.9) lahko zapišemo tudi v obliki enačbe (6.10).

$$\frac{V_0}{K'_{olje}} = C_H \quad (6.10)$$

C_H [m³Pa⁻¹] – hidravlična kapacitivnost
 K'_{olje} [Pa] – nadomestni modul stisljivosti olja

V_0 [ml] – začetni volumen tekočine

Hidravlično kapacitivnost lahko, analogno kot v mehaniki ali elektrotehniki, razumemo kot vrsto shranjevalnika energije. V ta namen v mehaniki uporabljam vzmeti, v elektrotehniki kondenzatorje, v hidravliki pa posebne plinske akumulatorje, ki imajo veliko večjo kapacitivnost, kot jo ima npr. hidravlična tekočina v cevi ali valju. Zaradi hidravlične kapacitivnosti se lahko energija tlaka oz. kinetična energija hidravličnega sistema shrani kot oblika energije spremembe volumna.

Stisljivost hidravlične tekočine povzroča vzmetno delovanje hidravličnih pogonov – blaži razne sunke in tako varuje (npr. pri orodnih strojih) orodje pred udarci. Po drugi strani pa velika stisljivost hidravlične tekočine zaradi svojega vzmetnega obnašanja povzroča:

- nihanja in udarce v hidravličnih napravah,
- zakasnitve pri preklopih (potrebno upoštevati pri kratkih vklopnih časih),
- neenakomerno gibanje pri nenadnih spremembah tlaka ali sile,
- nezaželene pojave pri povečanju volumna hidravličnega valja zaradi elastičnosti sten valja in cevovoda,
- nestabilno delovanje reguliranega sistema
- polnilne izgube črpalk, ...

Vpliv stisljivosti in pojavov, ki izhajajo iz te lastnosti tekočine, ima velik pomen pri preračunu hidravličnih udarov, enakomernosti delovanja pogona, nihanj in pojavu časovnih zakasnitev hidravličnega signala pri daljinsko vodenih hidravličnih pogonih.

6.1.1 Vpliv stisljivosti na hitrost širjenja zvoka

Hitrost širjenja zvoka je, poleg gostote, odvisna tudi od modula elastičnosti tekočine. Hitrost zvoka je torej odvisna od medija, po katerem se zvok širi. Bolj kot so molekule trdno povezane in bližje kot so, hitreje se zvok širi. Hitrost zvoka, ki potuje po tekočinah, lahko izračunamo po enačbi (6.11).

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\chi \cdot \rho}} \quad (6.11)$$

c [m/s] – hitrost zvoka

K [Pa] – modul stisljivosti

χ [Pa⁻¹] – stisljivost

ρ [kg/m³] – gostota tekočine

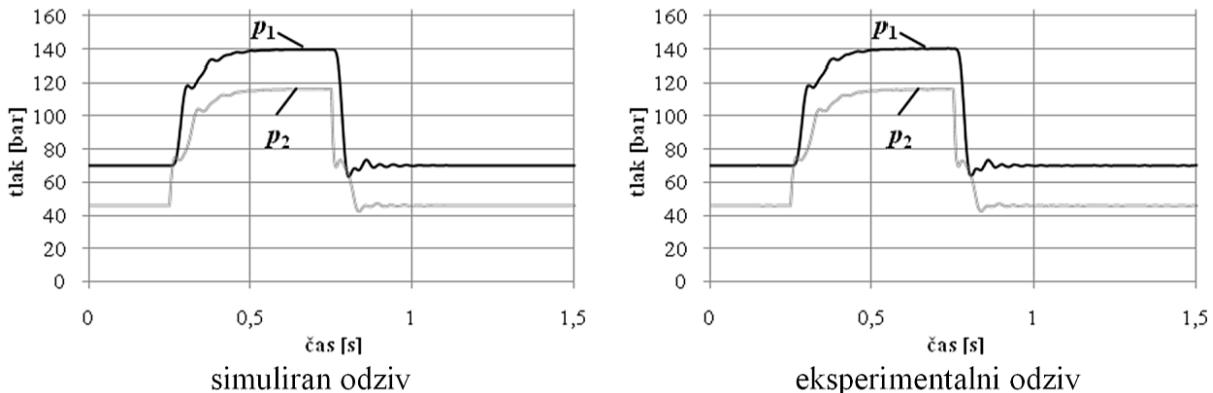
Vsaka sprememba stanja (tudi tlačna motnja, npr. tlačni val in tlačni udar) se v volumnu, napolnjenim s tekočino, npr. v hidravlični cevi, premika s hitrostjo zvoka c . Za hitrost zvoka v mineralnih hidravličnih oljih se najpogosteje navaja vrednost okoli 1320 m/s; sicer od 1000 do 1330 m/s, odvisno od vrste olja.

Hitrost zvoka je še posebej pomembna v primerih, kadar imamo opraviti s sistemi z veliko količino tekočine (velika kapacitivnost), npr. veliki hidravlični valji, in s sistemi velikih dimenzij kot so npr. dolgi cevovodi. V manjših, kompaktnih sistemih lahko vpliv vrednosti hitrosti zvoka zanemarimo. Vsekakor pa je ta vidik potrebno upoštevati v primeru dolgih cevovodov in še posebej takrat, ko gre za mehanično-hidravlični princip regulacije. V teh primerih lahko velika kapacitivnost in induktivnost sistema (dolg cevovod) pripeljeta do velike zakasnitve signala tlaka in posledično do nestabilnega delovanja reguliranega sistema. V takšnih primerih bi seveda hidravlična tekočina z visokim modulom stisljivosti občutno izboljšala odzivnost sistema.

Ta vidik lahko predstavimo na primeru preproste obravnave dinamičnega obnašanja cevovoda kot sestavnega dela reguliranega hidravličnega sistema. V cevih prihaja do velikih sprememb tlaka (kot se pojavljajo npr. pri regulaciji tlaka), pri čemer je potrebno upoštevati, da je tekočina v cevi elastična in da ima določeno maso. Cev lahko določen delež volumskega toka tekočine shrani - hidravlična kapacitivnost C_H , ob spremembi volumskega toka pa je potrebno tekočino, ki se nahaja med koncem in začetkom cevi, (z neko tlačno razliko) pospešiti - t.i. hidravlična induktivnost L_H . Za vrednosti C_H in L_H veljajo znane odvisnosti [71].

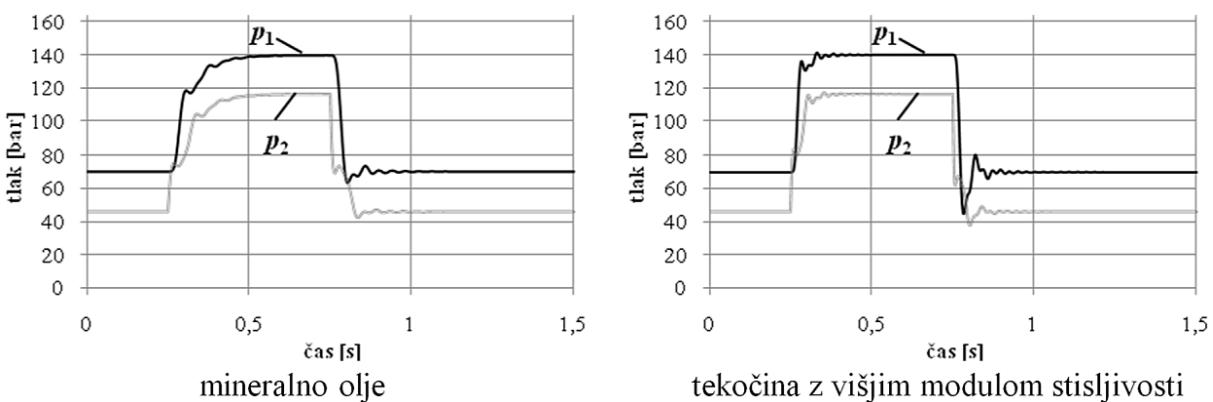
Za namene modeliranja cevi kot pomembnega dela hidravličnega reguliranega sistema, lahko uporabimo simulacijsko bolj ali manj zahtevne pristope. Kot dokaj enostaven in zelo uporaben pristop se je izkazalo modeliranje cevnega omrežja kot sistema z diskretnimi elementi, ki izhaja iz analogije z elektrotehniko. Slika 6.2 kaže uporabnost takšnega modeliranja v primerjavi z eksperimentom. Prikazano je dinamično obnašanje ob zaprtju in

ponovnem odprtju potnega ventila, nameščenega na koncu 35 m dolge cevi, pri čemer so bile razmere nastavljene tako, da se je tlak p_1 spremenjal približno med 70 bar in 140 bar (p_1 predstavlja tlak na začetku, p_2 pa na koncu cevi). Volumski tok po cevi je v vseh primerih enak in znaša 32 l/min. Kot hidravlična tekočina je bilo uporabljeno običajno mineralno olje [72].



Slika 6.2: Simuliran in realni skočni odziv cevovoda dolžine $l=35$ m [72]

Simulirani in eksperimentalno posneti poteki spremembe tlaka v celoti potrjujejo relevantnost modela, zato ga lahko uporabimo za simulacijo dinamike odziva za primer uporabe tekočine z višjim modulom stisljivosti – slika 6.3.



Slika 6.3: Primerjava odzivov za mineralno olje in tekočino z višjim modulom stisljivosti

Prikazana poteka sprememb tlaka kažeta, da je vpliv modula stisljivosti tekočine v cevnem omrežju pomemben vplivni faktor in ga je potrebno, npr. še posebej pri regulaciji tlaka, nujno upoštevati. V primeru uporabe tekočine z višjim modulom stisljivosti K so odzivni časi sistema za približno polovico krajsi.

Posredno preko hitrosti zvoka; enačba (6.11) velikost modula stisljivosti K vpliva tudi na velikost tlačnih udarov, ki se pojavljajo v hidravličnem sistemu, saj neposredno določa čas

širjenja udarnega vala t_{krit} (čas, ki ga udarni val potrebuje, da kot odbiti val pride ponovno nazaj do mesta nastanka, npr. ventila), kot prikazuje enačba (6.12).

$$t_{krit} = \frac{2l}{c} \quad (6.12)$$

t_{krit} [s] – čas širjenja udarnega vala

c [m/s] – hitrost zvoka

l [m] – dolžina cevovoda

Na osnovi enačbe (6.12) je v primeru, ko je zapiranje ventila končano v krajšem času kot je t_{krit} ($t_{zap} \leq t_{krit}$), možno izračunati največji možni tlačni udar-Joukowski udar po enačbi (6.13).

$$\Delta p_J = \sqrt{\rho K'_{olje}} \Delta v = \rho c \Delta v \quad (6.13)$$

Δp_J [s] – največji možni tlačni udar-Joukowski udar

ρ [kg/m³] – gostota tekočine

K'_{olje} [Pa] – nadomestni modul stisljivosti olja

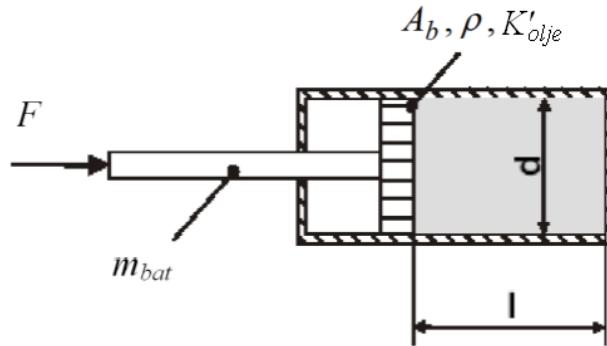
Δv [m/s] – sprememba hitrosti

c [m/s] – hitrost zvoka

V primeru uporabe tekočin z višjim modulom stisljivosti K je tudi hitrost širjenja motnje po cevi višja in s tem posledično je višji tudi tlačni udar. To dejstvo je seveda potrebno upoštevati tam, kjer je v ospredju problematika zmanjševanja tlačnih konic (npr. vzmet masa sistem v varnostnih ventilih).

6.1.2 Nihanja in togost valjev

V primeru, da na bat valja deluje sila, ki se spreminja po velikosti in po smeri, lahko zaradi elastičnosti tekočine, ter tudi sten valja in cevovodov, nastanejo nihanja. V analogiji z mehaniko, kjer neka masa, povezana z vzmetjo, niha, lahko zapišemo izraz za lastno frekvenco in togost oz. vzmetno konstanto hidravličnega valja, ki ga prikazuje slika 6.4.



Slika 6.4: Hidravlični valj napolnjen s tekočino

Vzmetno konstanto hidravlične tekočine v hidravličnem valju lahko izračunamo po enačbi (6.14).

$$c_{olje} = \frac{\Delta F}{\Delta l} = \frac{\Delta p A_b^2}{\Delta V_{olje}} = \frac{A_b^2}{C_H} = \frac{K'_{olje} A_b^2}{V_0} = \frac{K'_{olje} A_b}{l} \quad (6.14)$$

c_{olje}	[N/m]	– vzmetna konstanta hidravlične tekočine
ΔF	[N]	– sprememba sile
Δl	[m]	– pomik valja zaradi stisljivosti ob spremembi sile
K'_{olje}	[Pa]	– nadomestni modul stisljivosti olja
A_b	[m ²]	– površina bata
C_H	[m ³ Pa ⁻¹]	– hidravlična kapacitivnost
ΔV_{olje}	[m ³]	– sprememba volumna tekočine v valju
l	[m]	– položaj bata v valju

Lastno frekvenco hidravličnega valja lahko izračunamo po enačbi (6.15).

$$\omega_{0,bat} = \sqrt{\frac{A_b^2}{C_H m}} \quad (6.15)$$

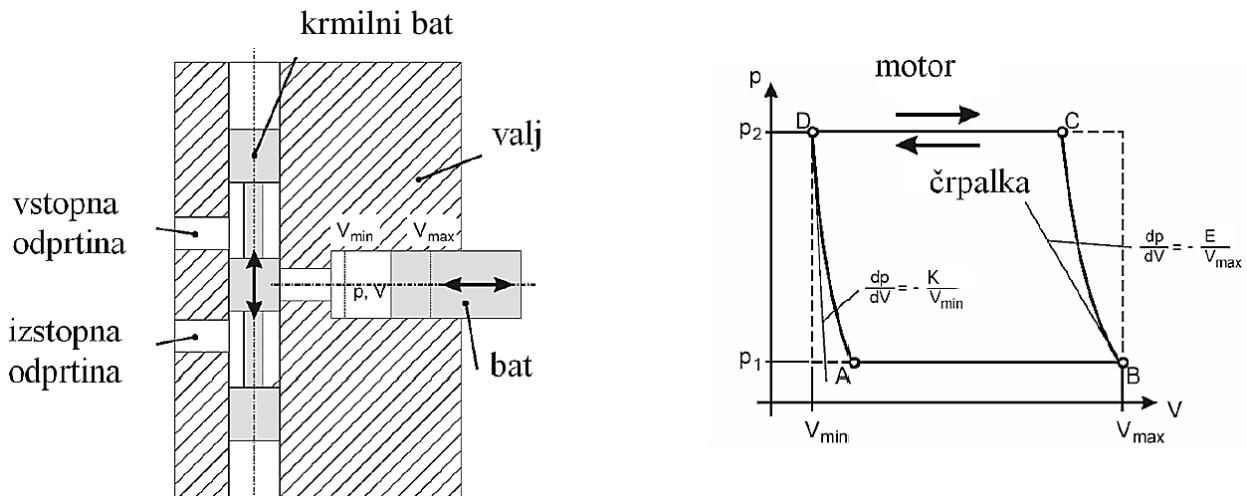
$\omega_{0,bat}$	[s ⁻¹]	– lastna frekvanca hidravličnega valja
m	[kg]	– masa bremena vključno z maso bata in batnice
A_b	[m ²]	– površina bata

Iz enačbe (6.14) je razvidno dobro znano dejstvo, da sta vzmetna konstanta in s tem lastna frekvencia linearno odvisni od modula stisljivosti in tudi od položaja bata v valju. Če naj bi s hidravličnim pogonom izvajali zelo hitra spreminjača se gibanja, je zaželena visoka

lastna frekvenca sistema, po možnosti daleč nad frekvenco obratovanja. Glede na to naj bi imeli valji po možnosti čim večjo vzmetno konstanto, kar se lahko doseže s povečanjem čelnih površin bata in s tem zmanjšanjem tlaka, ali z zmanjšanjem zaprtega volumna (z uporabo kratkih vodov med ventilom in valjem, sicer je potrebno volumen vodov so-upoštevati), kot tudi z uporabo hidravlične tekočine z višjim modulom stisljivosti K.

6.1.3 Vpliv na izkoristek črpalk in motorjev

V primeru oscilirajočih batov bodisi v hidravličnem valju ali pa v batni črpalki oz. v hidromotorju prihaja do zaustavljanja in pospeševanja bata ter s tem povezanih izgub, odvisnih tudi od velikosti modula stisljivosti uporabljane tekočine.



Slika 6.5: Splošni model hidrostatične enote in delovni diagram [70]

Zaradi stisljivosti tekočine spremembe tlaka med vstopno in izstopno odprtino niso nenadne oz. skokovite. Da se tlak spremeni z enega na drugi nivo, mora bat v valju opraviti določeno pot, kar odgovarja neki spremembi volumna komore. Tlak v valju narašča oz. upada v odvisnosti od adiabatnega modula stisljivosti, skladno z enačbo (6.16).

$$dp = -\frac{K}{V} dV \quad \text{oz.} \quad \left(\frac{dp}{dV}\right)_T = -\frac{K}{V} \quad (6.16)$$

dp	[Pa]	– sprememba tlaka
dV	[m ³]	– sprememba volumna komore
K	[Pa]	– modul stisljivosti olja
V	[m ³]	– volumen olja

Enačba (6.16) v delovnem diagramu podaja naklon oz. hitrost spremembe tlaka v odvisnosti od spremembe volumna komore. Ob upoštevanju velikosti volumna v točkah B in D (slika 6.5) v enačbi (6.16) pridemo do ugotovitve, da se sprememba tlaka ob stiskanju tekočine (točka B) prične z manjšim naklonom kot sprememba tlaka pri ekspanziji (točka D). Od tega je odvisna izgubljena pot oz. pomik bata na račun stisljivosti tekočine. Pri črpalkah npr. ta pojav predstavlja izgubljeni gib bata oz. volumen, posledično nižji volumetrični izkoristek črpalke in s tem večjo izgubo moči. Vpliv stisljivosti se še poslabša v primeru velikih mrtvih volumnov, kakršni so značilni za aksialne batne črpalke z votlimi bati (izvedba s poševno ploščo). Uporaba tekočin z višjim modulom stisljivosti tovrstne izgube zmanjšuje.

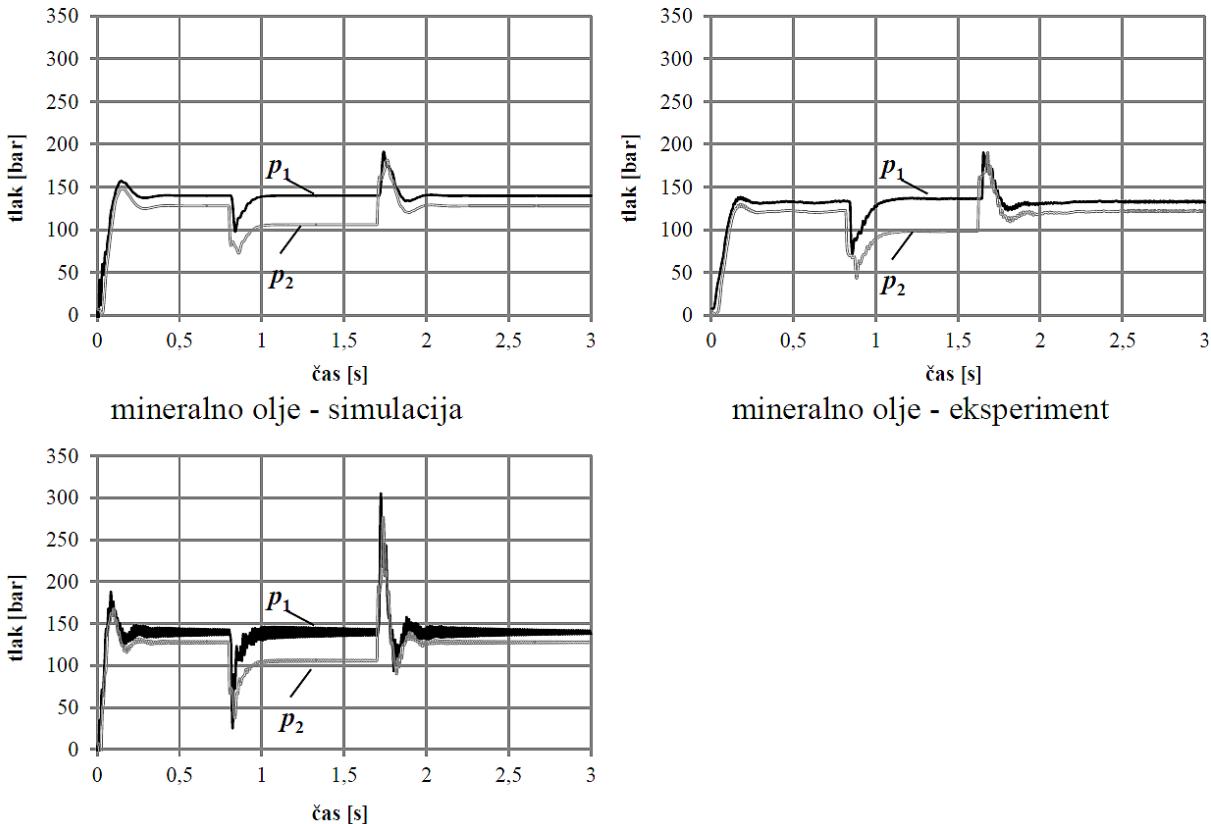
6.1.4 Vpliv na snovanje regulacije in parametriranje regulatorja

Glede na omenjeni vpliv višjega modula stisljivosti K na hitrost zvoka in višjo dinamiko širjenja motnje po ceveh (slika 6.3), lahko zaradi tega pričakujemo višjo dinamiko dogajanja v reguliranih hidravličnih pogonih. Kot primer podrobnejše poglejmo regulacijo tlaka, izvedeno z aksialno batno črpalko, pri čemer je v ospredju dinamika skočnega odziva na tlak 140 bar in motilnega odziva, ki odgovarja vklopu in odklopu porabnika ob 50 % spremembi pretoka črpalke (podrobnosti so opisane v [72]). Vpliv tekočine z višjim modulom stisljivosti K na dinamiko sprememb tlaka bo predstavljen na podlagi simulacijskega modela - slika 6.6, ki je bil zasnovan za uporabo klasičnega mineralnega olja, njegova natančnost pa potrjena z eksperimentom.

Uporabljen natančen simulacijski model obravnavane regulacije tlaka zajema natančno modeliranje uporabljene aksialne batne črpalke, porabnika in tudi cevovoda s svojo geometrijo in dinamiko (glej točko 6.1.2 in [72]). Pri tem je bil model zasnovan tako, da omogoča upoštevanje različnih snovnih lastnosti uporabljene tekočine – gostote, viskoznosti in tudi modula stisljivosti uporabljene tekočine.

Za namene ugotavljanja vpliva uporabe tekočine z višjim K modulom in primerjave odziva tlaka so bili uporabljeni enaki parametri uporabljenega klasičnega PDT₁ regulatorja. Na osnovi prikazanega odziva ob uporabi tekočine z visokim K modulom je moč videti pričakovane veliko višje tlačne konice, kar lahko pripelje ob enakih parametrih regulatorja, kot v primeru uporabe mineralnega olja, celo do nestabilne regulacije (na simulaciji je vidno visokofrekvenčno nihanje okoli želene vrednosti). Ob uporabi tekočin z višjim K modulom je ta vidik vsekakor potreben upoštevati: uporabiti primerno nastavitev parametrov regulatorja

(v kolikor analogni regulatorji na krmilni kartici takšno nastavitev fizično dopuščajo), ali pa uporabiti primerne adaptivne, regulacijske koncepte (npr. [73]).



Slika 6.6: Vpliv modula stisljivosti K na dinamiko regulacije tlaka

6.2 Načini merjenja stisljivosti tekočin

Stisljivost tekočin lahko merimo na dva načina; preko spremembe tlaka in prostornine ob znani začetni prostornini tekočine ter preko hitrosti zvoka, ki se širi po tekočini [74].

6.2.1 Merjenje stisljivosti tekočin preko spremembe tlaka in prostornine

Enačbo (6.1) lahko preoblikujemo tako, da iz nje izrazimo stisljivost po enačbi (6.17).

$$\chi = -\frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V_0} \quad (6.17)$$

Ugotovimo lahko, da moramo za izračun stisljivosti poznati tri veličine: prostornino tekočine, ki jo uporabljam za meritev, spremembo volumna in spremembo tlaka. Volumen

lahko spremenjamo s tlačenjem tekočine s pomočjo bata. Iz poti in preseka bata lahko izračunamo spremembo volumna tekočine po enačbi (6.18), pri tem pa ne smemo zanemariti spremembe volumna, ki nastane zaradi raztezka merilne naprave.

$$V = V_b - V_{raz} = \frac{S \cdot x}{1000} - V_{raz} \quad (6.18)$$

V_b [ml] – volumen, zaradi premika bata

V_{raz} [ml] – volumen raztezka merilne naprave

S [mm^2] – presek bata

x [mm] – pot bata

Volumen raztezka za okroglo cev lahko izračunamo iz deformacije premera cevi pri obremenitvi cevi z določenim tlakom po enačbi (6.19), deformacijo cevi na enoto tlaka pa po enačbi (6.20). Pri izračunu upoštevamo samo raztezek cevi, raztezka cevnih priključkov zaradi večje debeline sten zanemarimo.

$$V_{raz} = \frac{\pi}{4} (A_{DEF} - A) \cdot l = \frac{\pi}{4} (d_n + d_{nDEF} \cdot p)^2 - d_n^2 \cdot l \quad (6.19)$$

V_{raz} [mm^3] – volumen raztezka merilne naprave

A_{DEF} [mm^2] – presek deformirane cevi

A [mm^2] – presek cevi

d_n [mm] – notranji premer cevi

d_{nDEF} [mm/bar] – deformacija premera na enoto tlaka

p [bar] – tlak v cevi

l [mm] – dolžina cevi

$$d_{nDEF} = \frac{d_n^2}{2 \cdot E_{st} \cdot t} \quad (6.20)$$

d_n [mm] – notranji premer cevi

d_{nDEF} [mm/bar] – deformacija premera na enoto tlaka

E_{st} [bar] – modul elastičnosti cevi

t [mm] – debelina stene cevi

Spremembo tlaka lahko izmerimo z manometrom, začetni volumen pa izračunamo po enačbi (6.21) preko mase tekočine, ki smo jo nalili v merilno napravo.

$$V_0 = \frac{m}{\rho} = \frac{m_b - m_a}{\rho} \quad (6.21)$$

- V [ml] – volumen nalite tekočine
 m [g] – masa nalite tekočine
 m_b [g] – masa tekočine in vseh uporabljenih posod– pred nalivanjem
 m_a [g] – masa tekočine in vseh uporabljenih posod– po nalivanju
 ρ [g/ml] – gostota tekočine

6.2.2 Merjenje stisljivosti tekočin preko hitrosti zvoka, ki se širi po tekočini

Zvok je primer longitudinalnega valovanja, kjer se valovanje prenaša s pomočjo tlačnih razlik - zgoščin in razredčin. Valovanje se ustvari s prenosom nihanja elementa (membrane v zvočniku) na medij. Lahko se ustvari tudi z naglim premikom membrane večje amplitude – v zraku to slišimo kot pok, v tekočinah pa temu pravimo tlačni udar.

Iz enačbe (6.11) lahko izrazimo stisljivost, kot prikazuje enačba (6.22).

$$\chi = \frac{1}{c^2 \rho} \quad (6.22)$$

- c [m/s] – hitrost zvoka
 χ [Pa⁻¹] – stisljivost
 ρ [kg/m³] – gostota tekočine

Opazimo, da je hitrost zvoka v snoveh odvisna le od njihovih snovnih lastnosti. V primeru običajnega mineralnega hidravličnega olja sta to modul stisljivosti (1,6 GPa) in gostota (900 kg/m³), kar da rezultat okoli 1300 m/s ali 4800 km/h. To pomeni, da tlačni udar prepotuje razdaljo enega metra v manj kot 1 ms.

Hitrost zvoka lahko merimo na dva načina:

- iz spremembe položaja v določenem času,
- iz frekvence stoječega valovanja, ki se ustvari v obojestransko zaprti cevi.

Pri **merjenju hitrosti zvoka s spremembo položaja v določenem času** izračunamo hitrost kot kvocient med prepotovano razdaljo in za to porabljenim časom po enačbi (6.23).

$$c = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (6.23)$$

- | | | |
|------------|-------|---|
| c | [m/s] | – hitrost zvoka |
| Δl | [m] | – pot, ki jo prepotuje zvok |
| Δt | [s] | – čas, ki ga porabi zvok, da prepotuje pot Δl |

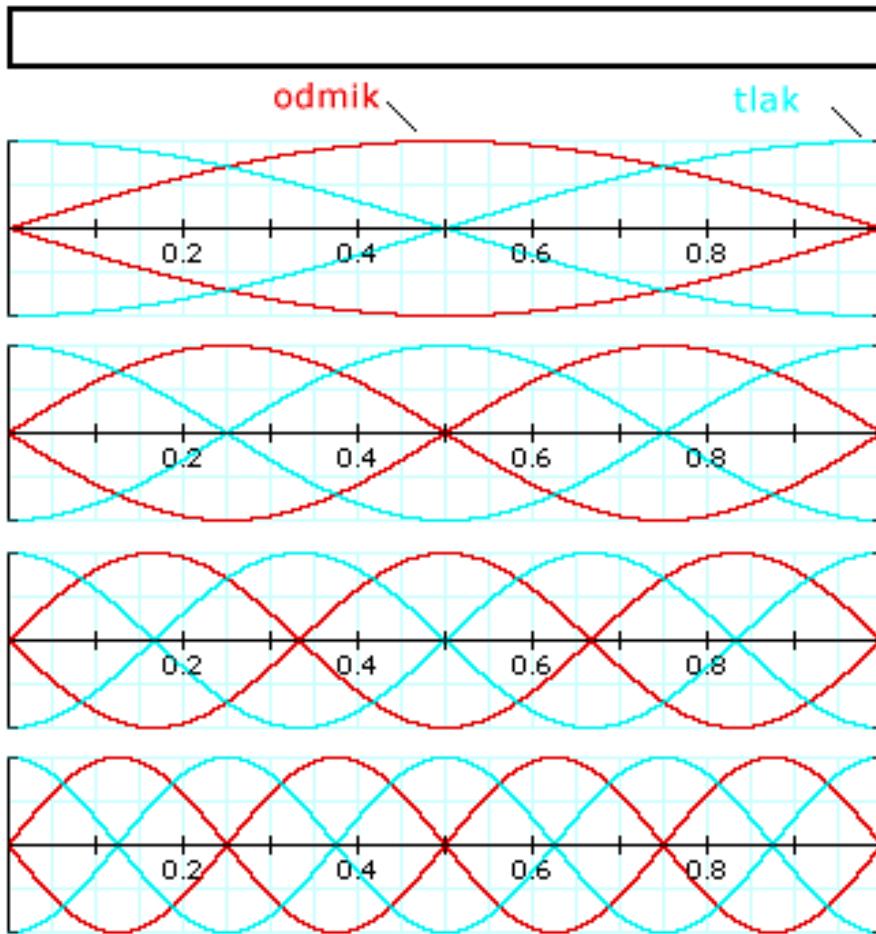
Da bomo lahko izmerili hitrost širjenja tlačnega udara torej potrebujemo dva senzorja, enega na začetku, drugega pa na koncu cevi. Senzorja morata biti dovolj hitra in natančna, da fronto tlačnega vala sploh zaznata. Prav tako pa potrebujemo še dovolj dobro merilno napravo, ki bo sposobna dovolj hitro vzorčiti signale, ki prihajajo od obeh senzorjev.

Druga možnost za merjenje hitrosti zvoka je **merjenje hitrosti zvoka iz frekvence stoječega valovanja**. Ko zvok potuje po cevi, ki je zaprta na obeh straneh, se ustvari stoječe valovanje, kot prikazuje slika 6.7. Na obeh koncih cevi so vozli valovanja - tam je amplituda odmika najmanjša. Pri osnovni harmonski komponenti je na sredi cevi hrbot valovanja - tam je amplituda odmika največja. Valovna dolžina valovanja je v tem primeru enaka dvakratniku dolžine cevi l . V cevi nastanejo tudi višje harmonske komponente, ki imajo n hrbtov (1, 2, 3, ...), njihove valovne dolžine pa so $\frac{2}{n} \cdot l$.

Če v bližino kateregakoli roba cevi postavimo tlačni senzor, lahko zaznamo valovanje kot spremembo tlaka. Tam valovanje povzroča tlačno nihanje določene frekvence. Frekvenco lahko iz signala izluščimo s t.i. FFT analizo (hitro Fourierovo transformacijo). Hitrost stoječega valovanja podaja enačba (6.24).

$$c = \nu \cdot \lambda \quad (6.24)$$

- | | | |
|-----------|-------|---------------------------------------|
| c | [m/s] | – hitrost stoječega valovanja |
| ν | [Hz] | – frekvanca stoječega valovanja |
| λ | [m] | – valovna dolžina stoječega valovanja |



Slika 6.7: Stopeče valovanje v obojestransko zaprte cevi

Za osnovni harmonik, ki ima največjo amplitudo, njegova valovna dolžina pa je enaka dvakratniku dolžine cevi, lahko zato z enačbo (6.25) zapišemo.

$$c = \nu \cdot 2l \quad (6.25)$$

c [m/s] – hitrost stopečega valovanja

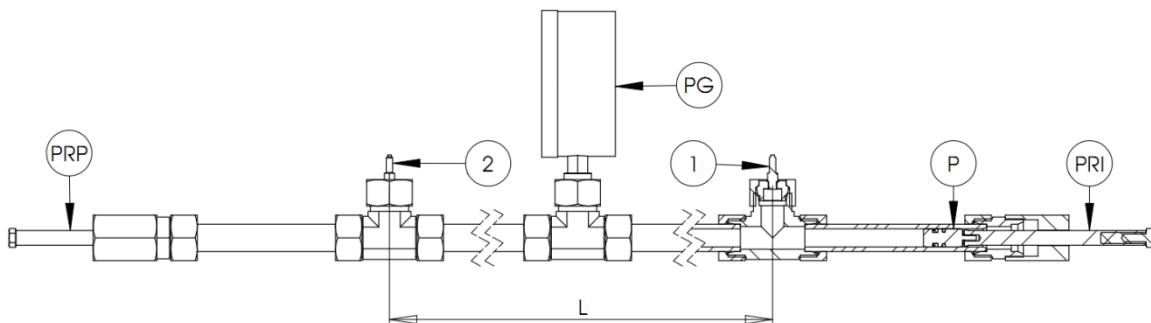
ν [Hz] – frekvenca stopečega valovanja

l [m] – razdalja med koncema cevi

6.3 Naprava za merjenje stisljivosti

Naprava za merjenje stisljivosti, ki jo prikazuje slika 6.8, je zasnovano tako, da lahko hkrati merimo stisljivost na vse tri omenjene načine. Sestavljena je iz hidravličnih cevi iz materiala E235, velikosti 30x5 - zunanjega premera 30 mm in debeline stene 5 mm. Notranji premer cevi in premer bata sta torej 20 mm. Cevi so povezane s cevnimi priključki težke izvedbe, velikosti 30S s progresivnimi obročki. Na obeh koncih se nahaja bat. Bat na levi

strani (premika ga batnica z oznako PRP) se uporablja za tlačenje tekočine. Premikamo ga z vrtenjem batnice na kateri je navoj M16x1,5. Glede na število zasukov lahko izračunamo volumen, za katerega se je zmanjšala tekočina. Ko se tekočina stisne, se poveča tlak, ki ga odčitamo na digitalnem prikazovalniku tlaka (PG). Bat na desni strani (P), ki ga premika batnica z oznako PRI, služi za generacijo tlačnega udara. Za razliko od PRP je PRI samo vodena in nima navoja. Z udarcem s kladivom po PRI v aksialni smeri se v tekočini ustvari tlačni udar, ki ga najprej zazna prvi piezoelektrični tlačni senzor (1), nato pa še drugi (2). Med senzorjem je razdalja L, ki znaša 4,146 m. Iz meritve časa, ki ga udar porabi za pot od (1) do (2), in razdalje L izračunamo hitrost zvoka. Ko se začne tlačni udar odbijati med obema batoma, se ustvari stoječe valovanje, ki počasi slablji. Signal po udarcu s kladivom zato zajemamo še nekaj časa, da zajamemo čim večji del njegovega poteka. Nato naredimo FFT in tako izmerimo frekvenco stoječega valovanja.



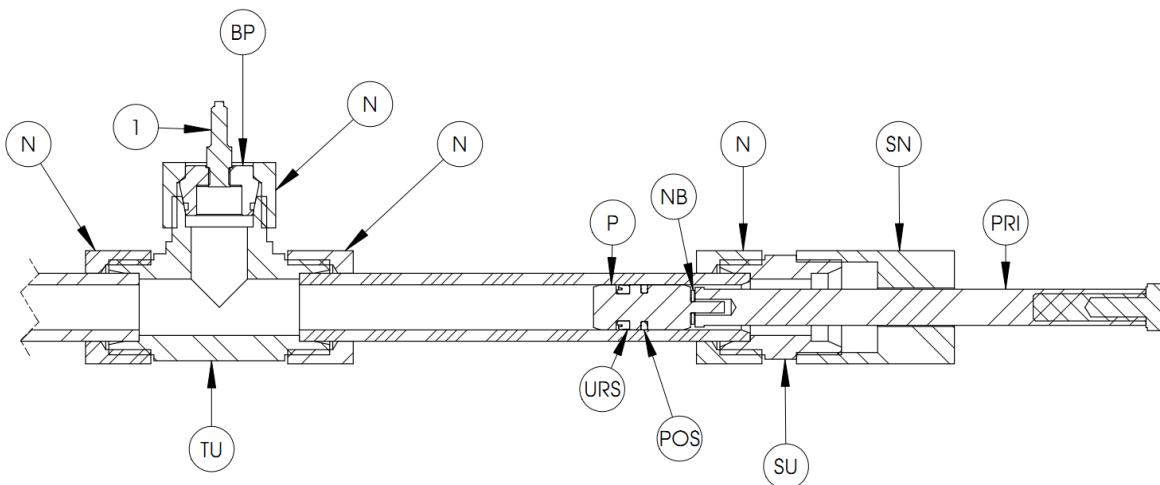
Slika 6.8: Naprava za merjenje stisljivosti

Vse pomembne karakteristične podatke naprave prikazuje preglednica 6.1.

Preglednica 6.1: Pomembnejši karakteristični podatki naprave za merjenje stisljivosti

modul elastičnosti cevi (jeklo E235)	$E_{st} = 2,1 \cdot 10^6$ bar
debelina stene cevi	$t = 5$ mm
notranji premer cevi premer bata	$d_n = 20$ mm
korak navoja	$k = 1,5$ mm
razdalja med piezoelektričnima senzorjem	$L = 4,146$ m
začetna razdalja med batoma pri tlaku 0 bar	$l_0 = 4,475$ m
dolžina vseh cevi v napravi	$l_c = 4,50$ m

Tekočino smo v sistem nalili tako, da smo najprej odstranili prikazovalnik tlaka (PG), ki je na sistem povezan z Minimess priključkom. Nato smo počakali, da je tekočina iz sistema izpodrinila zrak. Pri meritvi je kot med hitrima senzorjem (1,2) in prikazovalnikom tlaka (PG) večji od 90° - hitra senzorja sta obrnjena skoraj na glavo, da zrak ne ostaja pod njima. Slika 6.8 zaradi lažje predstave prikazuje kot 0° . Ko smo iz sistema odstranili ves zrak, smo prikazovalnik tlaka (PG) namestili nazaj in pričeli z meritvijo. Prečni prerez dela naprave za merjenje stisljivosti prikazuje slika 6.9.



Slika 6.9: Prečni prerez dela naprave za merjenje stisljivosti

Hitra senzorja (1,2) sta na sistem pritrjena s predelanim čepom (BP), v katerega je vrezan UNF 3/8" navoj. Čep je pritrjen na cevni priključek (TU – T kos, SU – dvojni navoj) z matico (N), prav tako kot so pritrjene cevi. Bat je tesnjen z dvema tesniloma, ki sta primerna za tlak višji kot 600 bar. Notranje tesnilo (URS) je U-obroček (ustnica) iz materiala NBR, zunanje tesnilo (POS) pa je sestavljen iz PTFE profilnega obročka, ki je podprt z O-obročkom iz NBR. Med batnico (PRI, PRP) in batom (P) je nameščen aksialni iglični ležaj (NB), ki skrbi, da se skupaj z batnico bat ne vrti, ampak se samo linearno premika. Batnica PRI je vodena s posebno matico, ki ima izvrtino premera 17 mm (SN), matica, ki vodi batnico PRP, pa ima dodatni notranji navoj.

Za zajem podatkov smo uporabili krmilnik Compact RIO, podjetja National Instruments, ki ga programiramo s programskim okoljem LabVIEW. Za hitro obdelavo podatkov je v krmilnik vgrajen tudi FPGA čip.

6.3.1 Hitri senzorji tlaka Piezotronics PCB 102B

Edini senzorji, ki so zmožni dovolj hitro reagirati na spremembo tlaka, so piezoelektrični senzorji. Takšni senzorji uporabljajo piezo kristal, na katerem se ob deformaciji pojavi naboj, ki ga moramo pred branjem še ojačiti. Težava takšnih senzorjev je predvsem drag nabojni ojačevalnik, zato so se v zadnjem času razvili tako imenovani IEPE³ oz. ICP⁴ senzorji, ki imajo ojačevalnik že vgrajen v senzor. Ker je ojačevalnik blizu piezo kristala, se lahko za ojačenje uporabi MOSFET ojačevalnik.

Izbrali smo senzorja tipa 102B, ki ju proizvaja podjetje Piezotronics in prikazuje slika 6.10. Senzorja napajamo s konstantnim tokom 2 mA, za kar skrbi modul v krmilniku Compact RIO, tlak pa merimo posredno preko padca napetosti na senzorju. Več podatkov o senzorjih prikazuje preglednica 6.2.

Preglednica 6.2: Podatki za hitra senzorja [75]

merilno območje (± 5 V)	345 bar
merilno območje - razširjeno (± 10 V)	690 bar
občutljivost	0,15 mV/kPa
resonančna frekvanca kristala	>500 kHz
pogrešek	< 1 % F.S. ⁵ = < 3.5 bar



Slika 6.10: Hitri tlačni senzor Piezotronics PCB 102B (levo) in nameščen v hidravlični priključek (desno) [75]

³ ang »Integrated Electronics Piezo Electric«

⁴ ang »Integrated Circuit Piezoelectric«

⁵ ang »Full Scale« – glede na celotno merilno območje

6.3.2 Digitalni prikazovalnik tlaka WIKA DG-10-S

Za merjenje spremembe tlaka smo uporabili prikazovalnik WIKA DG-10-S z navojnim priključkom G ½", na katerega je privit Minimess priključek. Podrobnejše podatke prikazuje preglednica 6.3.

Preglednica 6.3: Podatki digitalnega prikazovalnika WIKA DG-10-S [76]

merilno območje	600 bar
največji dovoljen tlak	1200 bar
največja dovoljena tlačna konica	2400 bar
pogrešek (IEC 61298-2)	$\pm 0,5 \% \text{ F.S.} \pm 1 \text{ digit (0,1 bar)} = \pm 3,1 \text{ bar}$
pogrešek (neponovljivost)	$\pm 0,1 \% \text{ F.S.} = \pm 0,6 \text{ bar}$

Zaradi lažjega odčitavanja smo izbrali senzor z digitalnim prikazovalnikom, ki ga prikazuje slika 6.11.



Slika 6.11: Digitalni prikazovalnik tlaka WIKA DG-10-S

6.3.3 Tehnica KERN PCB 6000-1

Za tehtanje nalite tekočine smo uporabili tehnicco z digitalnim prikazovalnikom KERN PCB 6000-1. Tehnicco prikazuje slika 6.12, njene osnovne podatke pa preglednica 6.4.

Preglednica 6.4: Podatki tehtnice KERN PCB 6000-1 [77]

merilno območje	6000 g
pogrešek	$\pm 0,3$ g
pogrešek (neponovljivost)	$\pm 0,1$ g

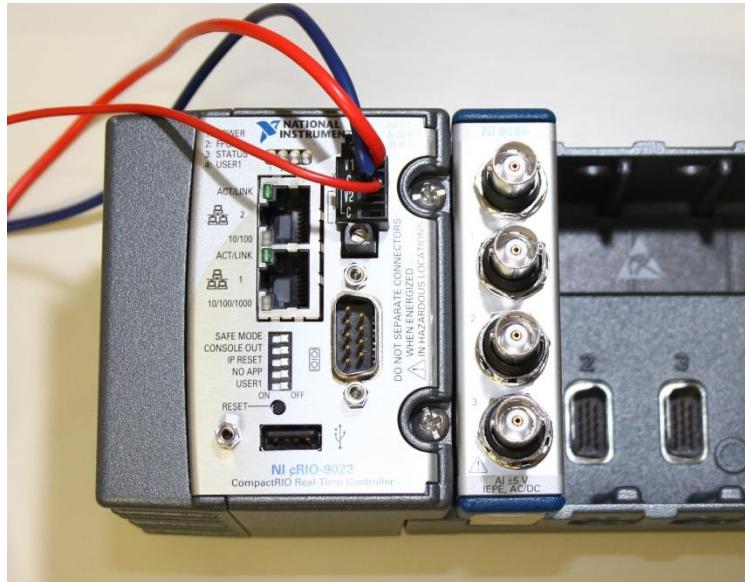


Slika 6.12: Tehtnica KERN PCB 6000-1 [78]

6.3.4 Krmilnik Compact RIO

Krmilnik Compact RIO smo izbrali zaradi njegove zmogljivosti, možnosti enostavne nadgradnje modulov in enostavnega programiranja. Krmilnik in vgrajen FPGA čip lahko programiramo s programskim orodjem LabVIEW. Krmilnik prikazuje slika 6.13.

Hitra senzorja smo priključili na IEPE modul (NI9234), nameščen v krmilniku Compact RIO, ki ga proizvaja podjetje National Instruments. IEPE modul skrbi za napajanje senzorjev s konstantnim tokom 2 mA in branje padca napetosti na njih. Za zajem podatkov je uporabljen program, ki je zapisan na FPGA čip, vgrajen v krmilniku. Program s frekvenco 51,2 kHz neprestano bere signale iz obeh senzorjev ter ima v spominu vedno 30000 vzorcev. Ko zazna spremembo na prvem senzorju, zajame še novih 25000 vzorcev, kar pomeni, da imamo na voljo 5000 vzorcev pred nastankom tlačnega udara in 25000 vzorcev po njem, kar zadošča za natančno analizo tlačnega udara. Po zajetem tlačnem udaru s posebnim algoritmom izračunamo zamik signalov med obema senzorjema ter frekvenco stoječega valovanja. Iz obeh podatkov lahko nato izračunamo hitrost zvoka.



Slika 6.13: Krmilnik Compact RIO – srce krmilnika (levo), IEPE modul (desno)

Točnost zajetih podatkov je odvisna od natančnosti IEPE modula. Njegove karakteristike predstavlja preglednica 6.5.

Preglednica 6.5: Podatki IEPE modula – NI9234 [79]

število kanalov	4
ločljivost	24 bit
frekvenca vzorčenja (f_s)	51,2 kS/s
pogrešek (kalibrirano $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) (nekalibrirano $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$\pm 0,006\%$ F.S. = 0,3 mV $\pm 0,04\%$ F.S. = 2,3 mV
natančnost ure (t_p)	$\pm 50\text{ppm} \pm 50\text{ }\mu\text{s/s} = \pm 0,0512\text{ S/s}$
ločljivost časovne baze	$\pm \left(\frac{1}{f_s} + t_p \right) = \pm 0,0695\text{ ms}$

6.4 Postopek merjenja stisljivosti

Meritve stisljivosti izvajamo po naslednjem postopku:

- Merilna naprava, tekočina in vse ostale naprave, ki jih bomo uporabili, so segrete na temperaturo prostora, ki jo tudi zabeležimo (T).
- Sestavimo preizkuševalnišče.
- Oblečemo se v ustrezna zaščitna oblačila.

- Stehtamo tekočino in vso uporabljeno opremo, ki bo prišla v stik s tekočino (razen naprave), maso zabeležimo (m_b).
- V napravo nalijemo tekočino.
- S tresenjem naprave povzročimo, da tekočina iz naprave izpodrine ves zrak – tekočino po potrebi dolijemo.
- Stehtamo preostalo tekočino in vso uporabljeno opremo, maso zabeležimo (m_a).
- Napravo zapremo.
- Začnemo z meritvijo pri stiskanju:
 - vijak na batnici (PRP) zasučemo za 1 vrtljaj,
 - z udarcem po batnici (PRI) sprožimo tlačni udar,
 - zabeležimo skupno število vrtljajev (n), zamik signalov (Δt), frekvenco stoječega valovanja (ν) in tlačno razliko (p),
 - postopek ponavljamo do tlaka 400 bar oz. dokler ne zmanjka navoja na batnici (PRP).
- Na enak način kot v prejšnji točki merimo raztezanje, le da vijak vrtimo v nasprotno smer.
- 1 liter tekočine iz naprave izlijemo v čisto posodo za laboratorijsko analizo gostote pri različnih tlakih na intervalu od 0 do 400 bar ($\rho(p)$).
- Izpraznimo preostalo tekočino.
- Napravo razstavimo in vse sestavne dele obrišemo do suhega.

6.5 Postopek računanja stisljivosti

Po končani meritvi izračunamo stisljivost po vseh treh načinih, opisanih v točki 6.2.

6.5.1 Izračun stisljivosti iz spremembe tlaka in prostornine

Izračunamo deformacijo premra cevi na enoto tlaka po enačbi (6.20).

$$d_{nDEF} = \frac{d_n^2}{2 \cdot E_{st} \cdot t} = \frac{20^2}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 5} = 1,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{bar}} \quad (6.26)$$

d_n [mm] – notranji premer cevi - preglednica 6.1

d_{nDEF} [mm/bar] – deformacija premora na enoto tlaka

E_{st} [bar] – modul elastičnosti cevi - preglednica 6.1

t [mm] – debelina stene cevi - preglednica 6.1

Volumen nalite tekočine izračunamo po enačbi (6.21)

$$V_0 = \frac{m_b - m_a}{\rho} \quad (6.27)$$

V_0 [ml] – volumen nalite tekočine

m_b [g] – točka 6.4

m_a [g] – točka 6.4

ρ [g/ml] – točka 6.4

Za vsako točko izračunamo spremembo volumna tekočine z združitvijo enačb (6.18) in (6.19), kot to prikazuje enačba (6.28).

$$V_i = S \cdot x - V_{raz} = \frac{\pi}{4} \cdot d_n^2 \cdot \frac{k}{1000} \cdot n_i - \frac{\pi}{4} \left((d_n + d_{nDEF} \cdot p_i)^2 - d_n^2 \right) \cdot l_c \quad (6.28)$$

V_i [mm³] – volumen i-te meritve

d_n [mm] – premer bata – preglednica 6.1

k [mm] – korak navoja – preglednica 6.1

d_{nDEF} [mm/bar] – enačba (6.26)

p_i [bar] – tlak v cevi pri i-ti meritvi – točka 6.4

l_c [m] – dolžina cevi v merilni napravi – preglednica 6.1

Nato lahko za vsako točko izračunamo še stisljivost po enačbi (6.29).

$$\chi_i = -\frac{1}{\Delta p_i \cdot 10^5} \cdot \frac{\Delta V_i}{V_0} = \frac{1}{(p_i - p_{i-1}) \cdot 10^5} \cdot \frac{(V_i - V_{i-1})}{V_0} \quad (6.29)$$

χ_i	[Pa ⁻¹]	– stisljivost i-te meritve
Δp_i	[bar]	– sprememba tlaka i-te meritve
p_i, p_{i-1}	[bar]	– tlaka i-te in i-1. meritve – točka 6.4
V_i, V_{i-1}	[ml]	– volumna i-te in i-1. meritve – enačba (6.28)
V_0	[ml]	– enačba (6.27)

6.5.2 Izračun stisljivosti iz hitrosti zvoka

Stisljivost iz hitrosti zvoka izračunamo po enačbi (6.22), pri tem pa moramo upoštevati, da se gostota tekočine v odvisnosti od tlaka spreminja.

$$\chi_i = \frac{1}{c_i^2 \rho(p_i)} \quad (6.30)$$

c_i	[m/s]	– hitrost zvoka i-te meritve
χ_i	[Pa ⁻¹]	– stisljivost i-te meritve
$\rho(p_i)$	[kg/m ³]	– gostota tekočine pri tlaku i-te meritve – točka 6.4

Izračun hitrosti zvoka preko spremembe položaja v času lahko opravimo po enačbi (6.23), ki jo v našem primeru lahko zapišemo z enačbo (6.31).

$$c_i = \frac{L}{\Delta t_i} \quad (6.31)$$

c_i	[m/s]	– hitrost zvoka i-te meritve
L	[m]	– razdalja med piezoelektričnima senzorjem-preglednica 6.1
Δt_i	[s]	– čas, ki ga porabi zvok, da prepotuje po L pri i-ti meritvi – točka 6.4

Izračun hitrosti zvoka iz frekvence stoječega valovanja lahko opravimo po enačbi (6.25), ki je za naš primer (6.33), vendar moramo prej po enačbi (6.32) izračunati še razdaljo med koncema cevi – v našem primeru razdaljo med batoma, ki je različna za vsako meritve.

$$l_i = l_0 - \frac{k}{1000} \cdot n_i \quad (6.32)$$

l_i	[m]	– razdalja med batoma pri i-ti meritvi
l_0	[m]	– razdalja med batoma pred začetkom merjenja – preglednica 6.1
k	[mm]	– korak navoja – preglednica 6.1
n_i	[/]	– število vrtljajev pri i-ti meritvi – točka 6.4

$$c_i = v_i \cdot 2l_i \quad (6.33)$$

c_i	[m/s]	– hitrost zvoka i-te meritve
v_i	[Hz]	– frekvenca stoečega valovanja i-te meritve – točka 6.4
l_i	[m]	– razdalja med batoma pri i-ti meritvi – enačba (6.32)

6.6 Izračun napak pri meritvah stisljivosti

V nadaljevanju bodo absolutne napake spremenljivke i označene z Δ_i , relativne napake pa z δ_i . Za napake veljajo enačbe (6.34) do (6.37).

$$\delta_i = \frac{\Delta_i}{i} \quad (6.34)$$

$$\Delta_{i\pm j} = \Delta_i + \Delta_j \quad (6.35)$$

$$\delta_{i\pm j} = \delta_i + \delta_j \quad (6.36)$$

$$\delta_{i^n} = n \cdot \delta_i \quad (6.37)$$

Absolutne in relativne napake vrednosti, ki se ne spreminjajo, prikazuje preglednica 6.6.

Preglednica 6.6: Absolutne in relativne napake vrednosti, ki se ne spremunjajo⁶

spremenljivka	sklic	vrednost	
$E_{st} = 2,1 \cdot 10^6$ bar	subjektivna ocena	$\Delta_{E_{st}} = \pm 0,105 \cdot 10^6$ bar	$\delta_{E_{st}} = 5\%$
$t = 5$ mm	$\delta_{d_n} = 0,75\%$	$\Delta_t = \pm 0,0375$ mm	$\delta_t = 0,75\%$
$d_n = 20$ mm	podatki cevi Benteler	$\Delta_{d_n} = \pm 0,15$ mm	$\delta_{d_n} = 0,75\%$
$k = 1,5$ mm	zanemarjeno	$\Delta_k = 0$	$\delta_k = 0\%$
$L = 4,146$ m	natančnost tračnega metra	$\Delta_{d_n} = \pm 2$ mm	$\delta_{d_n} = 0,04824\%$
$l_0 = 4,475$ m		$\Delta_{d_n} = \pm 2$ mm	$\delta_{d_n} = 0,04469\%$
$l_c = 4,50$ m		$\Delta_{d_n} = \pm 2$ mm	$\delta_{d_n} = 0,04444\%$

Absolutne in relativne napake spremenljivk prikazuje preglednica 6.7.

Preglednica 6.7: Absolutne in relativne napake spremenljivk

spremenljivka	sklic	vrednost	
m_b	odvisno od vrednosti spremenljivke	$\Delta_{m_b} = \Delta_{m_a} = \pm 0,1$ g	
m_a			
ρ	laboratorijska meritev	$\Delta_\rho = \pm 0,0001 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$	
p_i	Preglednica 6.3 - natančnost	$\Delta_{p_i} = \pm 3,1$ bar	
Δp_i	Preglednica 6.3 - ponovljivost	$\Delta_{\Delta p_i} = \pm 0,6$ bar	
Δt_i	Preglednica 6.5 - ločljivost časovne baze	$\Delta_{\Delta t_i} = \pm 0,0695$ ms	
v_i	odvisno od vrednosti spremenljivke		
n_i	subjektivna ocena	$\Delta_{n_i} = \pm 0,05$	

⁶ neosenčene celice so izračunane iz osenčenih (podatki)

6.7 Izračun modula stisljivosti ionske tekočine EMIM-EtSO₄ ter pripadajočih pogreškov za eno meritno točko

V okviru doktorske naloge smo analizirali veliko število različnih ionskih tekočin (točka 5), a smo potem merjenje stisljivosti opravili le z dvema. Razlogi so ekonomski (visoka cena ionskih tekočin in s tem omejene količine testnih vzorcev) in praktični (zaradi korozivnosti nekaterih ionskih tekočin jih nismo dodatno analizirali).

Preglednica 6.8 prikazuje absolutne in relativne napake meritve stisljivosti ionske tekočine EMIM-EtSO₄.

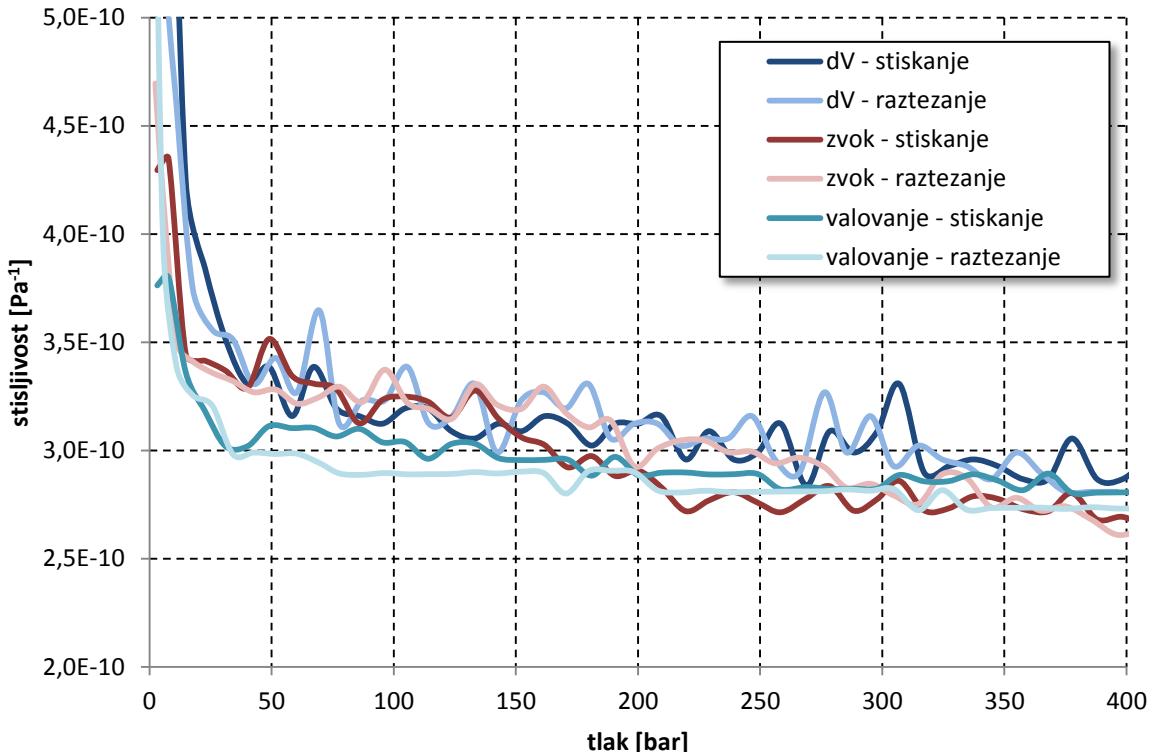
Preglednica 6.8: Absolutne in relativne napake meritve stisljivosti ionske tekočine EMIM-EtSO₄ za eno meritno točko

spremenljivka	vrednost	
$m_b = 3515,3 \text{ g}$	Preglednica 6.7	$\delta_{m_b} = \pm 0,002845 \%$
$m_a = 1654,4 \text{ g}$		$\delta_{m_a} = \pm 0,006044 \%$
$\rho = 1,24 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$		$\delta_\rho = \pm 0,008065 \%$
$p_i = 249 \text{ bar}$		$\delta_{p_i} = \pm 1,244 \%$
$\Delta p_i = 9,9 \text{ bar}$		$\delta_{\Delta p_i} = \pm 6,061 \%$
$\Delta t_i = 2,43364 \text{ ms}$		$\delta_{\Delta t_i} = \pm 2,856 \%$
$\nu_i = 187,636 \text{ Hz}$	$\Delta_{\nu_i} = \pm (\nu_i - \frac{1}{\frac{1}{\nu_i} + \Delta_{\Delta t_i}}) = \pm 2,415 \text{ Hz}$	$\delta_{\nu_i} = \pm 1,287 \%$
$n_i = 28$	Preglednica 6.7	$\delta_{n_i} = \pm 0,1786 \%$
stisljivost izračunana iz spremembe tlaka in prostornine (6.29)		
$\chi_{i,dV} = 2,99 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$	$\Delta_{\chi_{i,dV}} = \pm 2,61 \cdot 10^{-11}$	$\delta_{\chi_{i,dV}} = \pm 8,72 \%$
stisljivost izračunana iz spremembe položaja v času (6.30) in (6.31)		
$\chi_{i,z} = 2,78 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$	$\Delta_{\chi_{i,z}} = \pm 1,62 \cdot 10^{-11}$	$\delta_{\chi_{i,z}} = \pm 5,82 \%$
stisljivost izračunana iz frekvence stoječega valovanja (6.30) in (6.33)		
$\chi_{i,v} = 2,91 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$	$\Delta_{\chi_{i,v}} = \pm 7,80 \cdot 10^{-12}$	$\delta_{\chi_{i,v}} = \pm 2,68 \%$
povprečna stisljivost vseh meritev		
$\bar{\chi}_i = 2,89 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$	$\Delta_{\bar{\chi}_i} = \pm 5,21 \cdot 10^{-12}$	$\delta_{\bar{\chi}_i} = \pm 1,80 \%$

6.8 Rezultati meritev stisljivosti

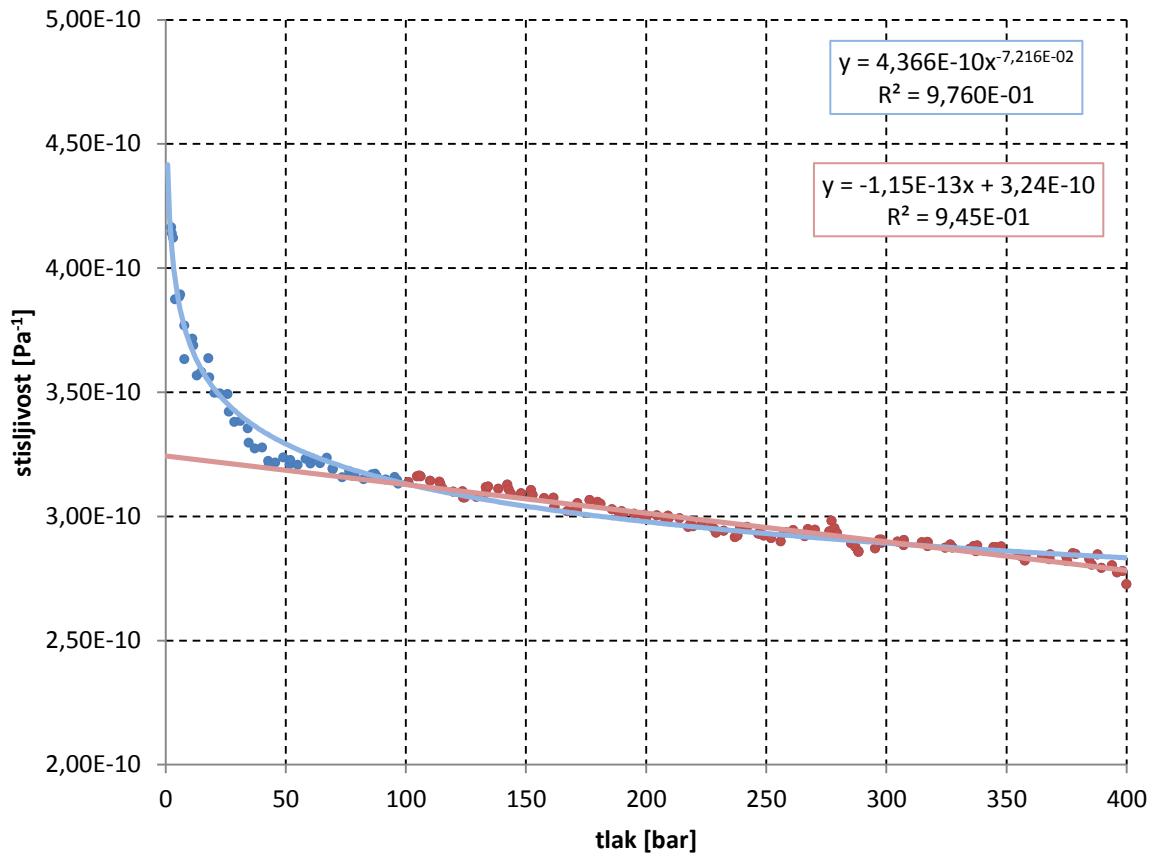
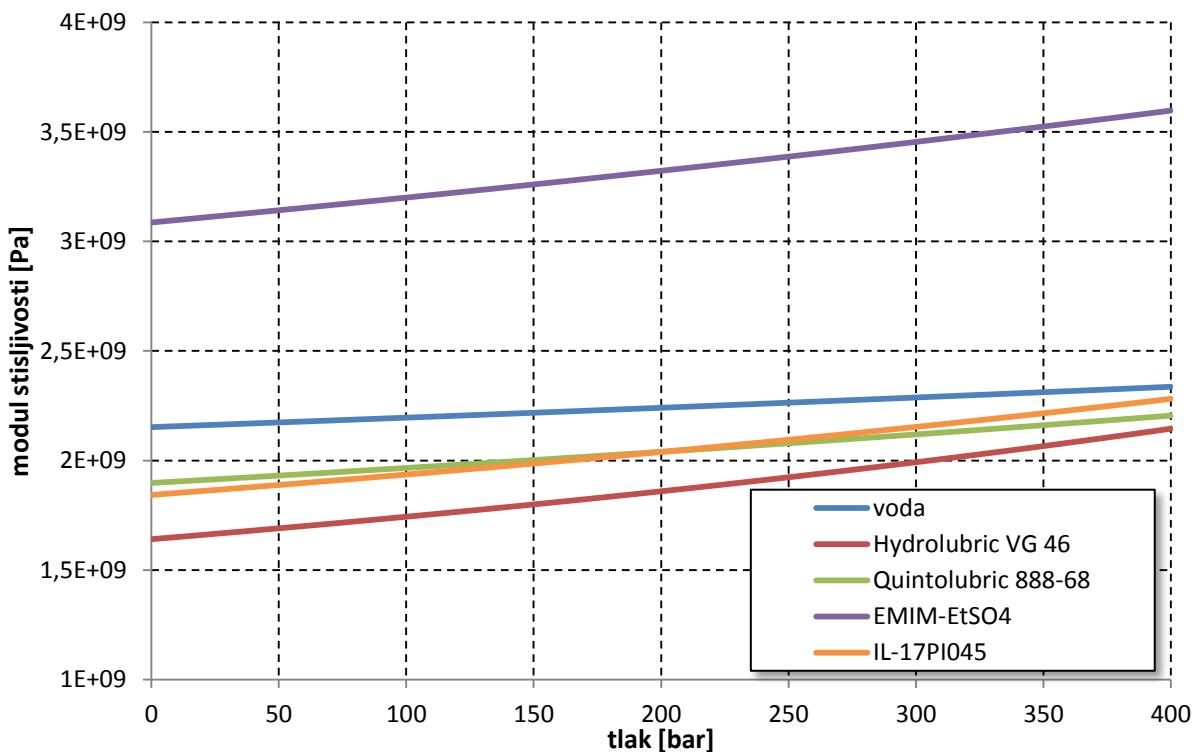
Izmerili smo stisljivost ionskih tekočin EMIM-EtSO₄ in IL-17PI045. Tekočini smo stisnili na 400 bar in nato razbremenili nazaj na atmosferski tlak. Podatke smo odčitali po vsakem zasuku vijaka – kar pomeni približno vsakih 8 bar. Rezultate merjenja stisljivosti na vse tri načine med stiskanjem in raztezanjem tekočine EMIM-EtSO₄ prikazuje slika 6.14.

Tako dobljene podatke smo nato združili, pri tem pa smo izbrisali vrednosti, ki so najbolj odstopale od ostalih (pri tistih je najverjetneje prišlo do kakšne napake pri meritvi).



Slika 6.14: Modul stisljivosti ionske tekočine EMIM-EtSO₄

Nato smo izračunali drseče povprečje širine 5 vrednosti. Dobljene točke smo nato aproksimirali s potenčno funkcijo. Zaradi vpliva zraka, ki je bil raztopljen v tekočini ali je ostal ujet v napravi, na meritve pri tlakih manjših od 100 bar, smo vrednosti pod 100 bar odstranili, preostale vrednosti pa aproksimirali z linearno funkcijo. Enačbi in poteki obeh funkcij za EMIM-EtSO₄ prikazuje slika 6.15.

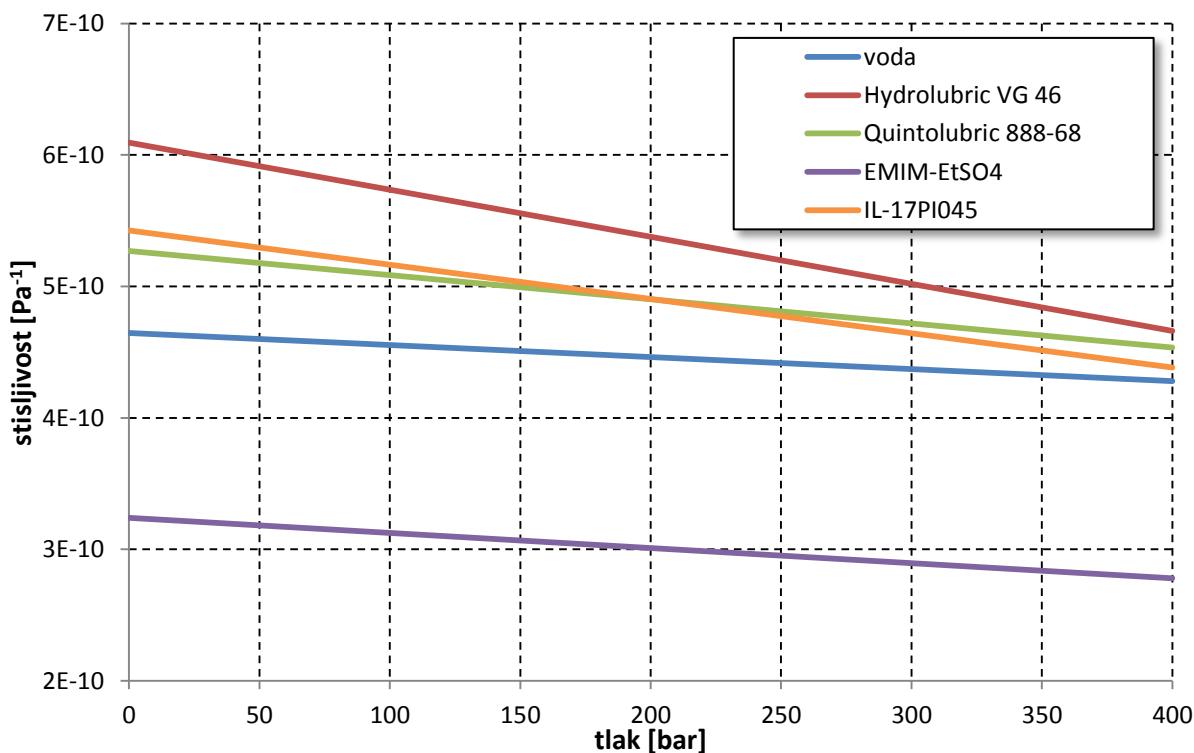
Slika 6.15: Statistično obdelani podatki stisljivosti ionske tekočine EMIM-EtSO₄

Slika 6.16: Izmerjen modul stisljivosti različnih tekočin v odvisnosti od tlaka

Za rezultate je bolj primerna linearna aproksimacija ter ekstrapolacija od 100 bar navzdol, saj ne upošteva vplivov zraka v tekočini. Na ta način lahko tudi najnatančneje določimo modul stisljivosti pri atmosferskem tlaku in primerjamo z drugimi tekočinami, kot to prikazuje slika 6.16 in preglednica 6.9, oziroma slika 6.17 in preglednica 6.10, ki prikazuje stisljivost - recipročno vrednost modula stisljivosti.

Preglednica 6.9: Izmerjen modul stisljivosti

tlak	modul stisljivosti [Pa]				
	voda	Hydrolubric VG 46	Quintolubric 888-68	EMIM-EtSO₄	IL-17PI045
0	2,15E+09	1,64E+09	1,90E+09	3,09E+09	1,84E+09
50	2,17E+09	1,69E+09	1,93E+09	3,14E+09	1,84E+09
100	2,2E+09	1,74E+09	1,97E+09	3,2E+09	1,85E+09
200	2,24E+09	1,86E+09	2,04E+09	3,32E+09	1,85E+09
400	2,34E+09	2,15E+09	2,2E+09	3,6E+09	1,85E+09



Slika 6.17: Izmerjena stisljivost tekočin v odvisnosti od tlaka

Preglednica 6.10: Izmerjena stisljivost

tlak	stisljivost [Pa⁻¹]				
	voda	Hydrolubric VG 46	Quintolubric 888-68	EMIM- EtSO₄	IL-17PI045
0	4,65E-10	6,09E-10	5,27E-10	3,24E-10	5,43E-10
50	4,60E-10	5,91E-10	5,18E-10	3,18E-10	5,42E-10
100	4,55E-10	5,74E-10	5,09E-10	3,13E-10	5,42E-10
200	4,46E-10	5,38E-10	4,90E-10	3,01E-10	5,41E-10
400	4,28E-10	4,66E-10	4,54E-10	2,78E-10	5,41E-10

6.8.1 Ugotovitve pri merjenju stisljivosti tekočin

Stisljivost hidravlične tekočine je kot snovna lastnost hidravlične tekočine ključnega pomena, še posebej na področju visokotlačne hidravlike. V primerjavi z vodo kot hidravlično tekočino, ali tekočinami na vodni osnovi, ima mineralno olje dokaj visoko stisljivost, kar povzroča določene nezaželene pojave pri delovanju hidravličnega sistema, še posebej v primerih, ko je zaželena visoka togost pogonov. Po drugi strani tekočine na vodni osnovi tovrstnih slabosti nimajo, vendar imajo pomanjkljivosti glede mazalnih sposobnosti in izhlapevanja. Za primerjavo smo izmerili tudi stisljivost sintetične, težko vnetljive hidravlične tekočine Quintolubric 888-68, ki je nekoliko nižja kot pri mineralnem olju. Ena od bistvenih prednosti ionskih tekočin naj bi bila tudi veliko nižja stisljivost, kot jo ima mineralno olje. To se je pri naših meritvah v primeru EMIM-EtSO₄ tudi pokazalo, saj je njena stisljivost celo nižja kot pri vodi. Za to tekočino lahko s stališča stisljivosti rečemo, da je zaradi svoje togosti bolj primerna za uporabo v hidravličnih sistemih kot mineralno hidravlično olje. Stisljivost tekočine IL-17PI045 pa je le nekoliko nižja kot pri mineralnem olju.

Pri meritvah stisljivosti različnih tekočin smo ugotovili tudi naslednje:

- Pri nalivanju tekočin, v katere se hitro ujamejo zračni mehurčki (npr. mineralno olje), je treba tekočino v napravo nalivati počasi, enakomerno in iz čim manjše višine. Najbolje je, če uporabimo lijak.
- Predvsem pri tekočinah z večjimi viskoznostmi je treba počakati dlje, da se iz naprave izloči ves zrak, po potrebi pa moramo za pospešenje tega procesa napravo tudi nagniti.
- Tesnjenje naprave pri večjih tlakih zelo vpliva na stisljivost, dobljeno s spremembijo tlaka pri spremembi volumna, saj v primeru, da iz naprave izteče oz. se kakorkoli drugače izmuzne 50 ml tekočine, tlak pade za približno 1 bar.

6.8.2 Ugotovitve pri merjenju stisljivosti tekočine EMIM-EtSO₄

Ionska tekočina EMIM-EtSO₄ se je zelo oprijela površine večine uporabljenih materialov (steklo, jeklo, NBR, ...). Površino je zelo težko osušiti, saj je tekočino težko obrisati, poleg tega pa tekočina skoraj ne hlapi (tudi tanek sloj ne izhlapi več mesecev).



Slika 6.18: Rja na čepu zaradi reakcije z ionsko tekočino

Po meritvi stisljivosti te ionske tekočine smo merili stisljivost vode. Ko smo vodo po meritvi izlili iz naprave, je vsebovala veliko rjavih delcev (najverjetneje rja), ki jo je povzročila ionska tekočina kljub temu, da smo po meritvi napravo temeljito obrisali s krpo. Prav tako so vsi nezaščiteni jekleni deli, ki so prišli v stik z ionsko tekočino, začeli rjaveti. Najbolj je bil poškodovan predelan čep za montažo hitrih senzorjev, ki ga prikazuje slika 6.18.

7 SKLEP

Doktorska disertacija obravnava en segment izredno širokega in kompleksnega področja ionskih tekočin, ki so ena izmed novejših vej na področju tehničnih tekočin. Njen cilj se osredotoča na oceno njihove primernosti za uporabo v hidravličnih sistemih.

V okviru disertacije je bilo največ dela vloženega v iskanje takšne ionske tekočine, ki bi v hidravličnih sistemih nudila zadostno korozjsko zaščito in sicer tudi ob prisotnosti vlage ter izpolnjevala tudi vse ostale lastnosti, katere morajo izpolnjevati hidravlične tekočine. Za namene testiranja korozjske zaščite smo opravili obširna testiranja v vlažni komori, dodatno pa tudi teste korozivnosti na baker in korozije na zraku. Ugotovili smo, da večina testiranih ionskih tekočin ne nudi ustrezne zaščite pred korozijo, še zlasti ob prisotnosti vlage/vode.

Mazalne lastnosti hidravlične tekočine so v sodobnih hidravličnih sistemih zaradi naraščajočih tlakov zelo pomembne, saj omogočajo dolgo uporabno dobo hidravličnih sestavin. Nekatere ionske tekočine so se izkazale z izjemnimi mazalnimi lastnostmi pri visokih tlakih, vendar so njihove lastnosti pri nižjih obremenitvah slabše. Z meritvami točke zavaritve in premera obrabne kalote na štirikrogelnem aparatu in koeficiente trenja (Stribeckove krivulje) smo ugotovili, da imata IL-17PI045 in EMIM-EtSO₄ boljše mazalne lastnosti kot mineralno hidravlično olje.

Prav tako smo opravili teste združljivosti z običajnimi sestavnimi deli hidravličnih sistemov. Ugotovili smo, da sta obe omenjeni ionski tekočini združljivi z različnimi sestavnimi deli hidravličnih ventilov.

Kot potencialni hidravlični tekočini sta se tako najbolje izkazali ionski tekočini IL-17PI045 in EMIM-EtSO₄. Smernice in omejitve za njuno rabo v hidravličnih sistemih podaja točka 7.1.

Naslednje težišče raziskovalnega dela je bila študija vpliva stisljivosti na delovanje hidravličnega sistema. Obe omenjeni ionski tekočini imata višji modul stisljivosti, oziroma manjšo stisljivost kot mineralno hidravlično olje, EMIM-EtSO₄ pa celo manjšo kot voda. S tega vidika sta torej bolj primerni za uporabo v hidravličnih sistemih kot mineralno olje, še zlasti v visokotlačnih področjih.

Fizikalno kemijske lastnosti ionskih tekočin smo določali s standardiziranimi laboratorijskimi metodami, ki jih uporabljamo za analiziranje konvencionalnih maziv, delno pa tudi z nestandardiziranimi metodami. Večina metod je primerna tudi za analiziranje

ionskih tekočin, vendar to ne velja za vse. Zato bi bilo nekatere v bodočnosti potrebno modificirati, da bi bile bolj primerne tudi za ionske tekočine.

Skozi raziskave smo tako potrdili zastavljene osnovne teze:

- a) Med številnimi možnostmi smo na podlagi dosegljivih študij in lastnih izkušenj najprej selekcionirali in nato sintetizirali ter v nadaljevanju testirali tiste lastnosti ionskih tekočin oz. njihove fizikalno kemijske lastnosti, ki so potrebne za uporabo v sodobnih hidravličnih sistemih (prva teza).
- b) Z raziskavami smo potrdili, da imajo določene, že znane ionske tekočine primerljive lastnosti, kot trenutno najpogosteje uporabljano mineralno hidravlično olje. Določene vrste ionskih tekočin pa imajo veliko boljše, več kot odlične, če že ne ekstremno dobre posamične lastnosti kot npr. izredno majhno stisljivost, izjemno visoko vrednost točke zavaritve, izredno nizko obrabo pri nižjih obremenitvah,(druga teza). Te lastnosti niso odlične samo za uporabo ionske tekočine kot hidravlične tekočine temveč so primerne tudi za uporabo v sorodnih triboloških sistemih, npr. zobniška gonila, prisotnost visoke temperature, ...
- c) Prav tako smo potrdili tudi tretjo postavljeno tezo, da je za ovrednotenje in testiranje ionskih tekočin, primernih za uporabo kot hidravlične tekočine, možno uporabiti standardizirane postopke, ki se primarno uporablajo za mineralna olja. Večino testov smo opravili z običajnimi standardiziranimi postopki, ob uporabi običajne laboratorijske opreme. Skozi teste smo podali tudi ocene o njegovi popolni primernosti za testiranje ionskih tekočin oz. zapisali komentarje glede primernosti, npr. standardizirani test filtrabilnosti s celuloznim filtrom, pa čeprav danes v glavnem uporabljamо filtre s steklenimi vlakni.

7.1 Smernice in omejitve pri rabi ionskih tekočin v hidravličnih sistemih

Iz predstavljenih rezultatov raziskovalnega dela izhajajo napotki za uporabo ionskih tekočin v hidravličnih sistemih in nekatere omejitve.

Ker so nekatere ionske tekočine – v našem primeru EMIM-EtSO₄ – zelo toge, je potrebno paziti pri simulacijskih algoritmih.

Večina testiranih ionskih tekočin je bila korozivna zlasti ob prisotnosti vlage. To pomeni, da je potrebno zaradi tega še večjo pozornost nameniti preprečevanju vlage v hidravličnem sistemu. Alternativa je sicer uporaba nerjavnih hidravličnih sestavin, ki pa bi pomenila neželene konstrukcijske in cenovne spremembe.

Ionska tekočina IL-17PI045 ni združljiva z običajnimi barvnimi premazi hidravličnih rezervoarjev. Zato le-ti v primeru njene uporabe ne smejo biti lakirani. Naslednja omejitev pri uporabi te tekočine je nezdružljivost s celuloznimi filtrskimi elementi. To pomeni, da v primeru uporabe te tekočine v hidravličnem sistemu ne bi bilo možno uporabiti absorpcijskih filtrskih elementov, ki so običajno na osnovi celuloze.

Trenutno je ena največjih omejitev za širšo tehnično uporabo ionskih tekočin, tudi v hidravličnih sistemih, neprimerno višja cena od konvencionalnih hidravličnih tekočin. Pri raziskovalnem delu ugotovljene prednosti ionskih tekočin niso tako velike, kot bi lahko sklepali iz razpoložljive literature in kot smo pričakovali pred začetkom dela, tako da pri uporabi v hidravličnih sistemih v večini primerov ne bi odtehtale neprimerno višje cene.

7.2 Možna področja uporabe v hidravličnih in mazalnih sistemih

Bistvena omejitev pri praktični rabi ionskih tekočin v hidravličnih sistemih je danes visoka cena. Ta se bo z razvojem in razširitvijo ponudbe ionskih tekočin na trgu v bližnji prihodnosti nedvomno krepko znižala. Dotlej pa ostajajo ciljno področje uporabe ionskih tekočin v hidravliki malo volumski hidravlični sistemi, na primer vetrnice, mobilna hidravlika in podobno.

Nekatere testirane ionske tekočine so se izkazale za potencialno bolj primerne na drugih področjih uporabe, kot pa so hidravlični sistemi. To odpira nove možnosti njihove rabe, na primer kot tekočine za zobniške prenosnike in obdelovalne tekočine.

Opravljeni raziskave predstavljajo zgolj skromen začetek raziskav v to obširno področje novih maziv z obetajočimi lastnostmi. Raziskave bi lahko razširili še na uporabo ionskih tekočin v drugih triboloških sistemih, na uporabo ionske tekočine kot aditiv obstoječim mineralnim oljem z raziskavo nadomeščanja določenega paketa aditivov, raziskali možnosti uporabe programsko podprtga orodja za usmerjeno določanje lastnosti ionskih tekočin kot tehničnega maziva, ...

Predvsem pa bi bilo v nadaljevanju raziskovalnega dela smiselno, izbrane ionske tekočine testirati še v realnem hidravličnem sistemu. Vsi dobljeni rezultati predstavljenih raziskav in omenjene omejitve so vsekakor lahko v veliko pomoč pri izbiri ustreznih sestavin sistema in predstavljajo smernice za nadaljnje delo na tem področju.

SEZNAM UPORABLJENIH VIROV

- [1] Lovrec Darko, Kambič Milan. *Hidravlične tekočine in njihova nega*. Maribor : Fakulteta za strojništvo, 2007.
- [2] Hodges Peter. *Hydraulic Fluids*, London : Arnold, 1996.
- [3] Savić Vladimir, Jocanović Mitar. *Karakteristike i degradacija ulja za podmazivanje*. Novi Sad : Ikos, 2004
- [4] Kambič Milan, Lovrec Darko. Hidravlične tekočine prihodnosti : na poti iskanja idealne hidravlične tekočine. V: Lovrec Darko (ur.), Tič Vito (ur.). *Zbornik prispevkov Mednarodne konference Fluidna tehnika 2011, 15. in 16. september 2011, Kongresni center Habakuk, Maribor, Slovenija*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2011, str. 149-162.
- [5] Savić Vladimir, Zirojević Ljubo. *Uljna hidraulika 3*. Novi Sad : Ikos, 2003.
- [6] Mandaković Robert (ur.). *Klasifikacije i specifikacije maziva i srodnih proizvoda*. Zagreb : Hrvatsko društvo za goriva i maziva, 2005.
- [7] Johnson Keith. What's an Ionic Liquid? *The electrochemical society interface* (2007), Spring, str. 38-41.
- [8] Marković Snežana. *Ionske tekočine : seminar*. Ljubljana : Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, 2006.
- [9] Freemantle Michael. *An introduction to ionic liquids*. Cambridge : The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, Science Park, Milton Road, 2010.
- [10] Laus Gerhard, Bentivoglio Gino, Schottenberger Herwig, Kahlenberg Volker, Kopacka Holger, Röder Thomas, Sixta, Herbert. Ionic liquids: Current developments, potential and drawbacks for industrial applications. *Lenzinger Berichte* (2005), vol. 84, str. 71-85.
- [11] Wasserscheid Peter, Welton Thomas (ur.). *Ionic Liquids in Synthesis*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2003.
- [12] Joglekar Hemant G., Rahman Imran, Kulkarni Bhaskar D. The path ahead for ionic liquids. *Chemical Engineering Technology* (2007), vol. 30, no. 7, str. 819-828.
- [13] Rebelo Luis, Lopes José Canongia, Esperança José, Filipe Eduardo: On the critical temperature, normal boiling point, and vapor pressure of ionic liquids. *The Journal of Physical Chemistry B* (2005), vol.109, no. 13, str. 6040-6043.

- [14] Predel Tim, Schlücker Eberhard, Wasserscheid Peter, Gerhard Dirk, Arlt Wolfgang. Ionic liquids as operating fluids in high pressure applications. *Chem. Eng. Technol.* (2007), vol 30, no. 11, str. 1475-1480.
- [15] Minami Ichiro, Kamimura Hideto, Mori Shigeyuki. Thermo-oxidative stability of ionic liquids as lubricating fluids. *Lubrication Science* (2007), vol. 24, no. 3, str. 135-147.
- [16] Uerdingen Marc, Treber Claudia, Balser Martina, Schmitt Günter, Werner Christoph. Corrosion behaviour of ionic liquids. *Green Chemistry* (2005), vol. 5, no. 7, str. 321-325.
- [17] Zhang Liu, Feng Dapeng, Xu Bin, Liu Xuqing and Liu Weimin. The friction and wear characteristics and lubrication mechanism of imidazole phosphateionic liquid. *Science in China Series E: Technological Sciences* (2009), vol. 52, no. 5, str. 1191-1194.
- [18] Hua Zhao. Innovative applications of ionic liquids as »green« engineering liquids. *Chemical Engineering Communications* (2006), vol. 193, no. 12, str. 1660-1677.
- [19] Thomas Schubert. How »Green« are Ionic Liquids? *Ionic Liquids Today* (2005), vol. 1, no. 1, str. 3-3.
- [20] Frade Raquel, Alfonso Carlos. Impact of ionic liquids in environment and humans:an overview. *Human&Experimental Toxicology* (2010), vol. 29, no. 12, str. 1038-1054.
- [21] Fukaya Yukinobu, Lizuka Yoshiki, Sekikawa Kenta, Ohno Hiroyuki. Bio ionic liquids: room temperature ionic liquids composed wholly of biomaterials. *Green Chemistry* (2007), vol. 11, no. 9, str. 1155-1157.
- [22] Ionic liquids: Frequently asked questions [svetovni splet]. BASF. Dostopno na WWW: <http://www.intermediates.bASF.com/chemicals/ionic-liquids/faq> [03.07.2012].
- [23] Reisinger Andreas. Contract research&development at Iolitec. *Ionic Liquids Today* (2007), vol. 3, no. 3, str. 2-4.
- [24] Van Rensselar Jean. Unleashing the potential of ionic liquids. *Tribology & Lubrication technology* (2010), vol. 66, no. 4, str. 24-31.
- [25] Holbrey John, Reichert Matthew, Reddy Ramana, Rogers Robin. Heat capacities of ionic liquids and their applications as thermal fluids. *Ionic Liquids as Green Solvents*, ACS Symposium Series, str. 121-133, 2003
- [26] Siedlecka Ewa M., Czerwcka Małgorzata, Stolte Stefan, Stepnowski Piotr. Stability of ionic liquids in application conditions. *Current Organic Chemistry* (2011), vol. 15, str. 1974-1991.
- [27] Proionic: Innovative processes with ionic liquids [svetovni splet]. Dostopno na WWW: http://www.proionic.com/_pdf/presse/proionic_PressRelease.pdf [08.11.2014].

- [28] Pensado A.S., Comunas M.J.P., Fernandez J. The pressure-viscosity coefficient of several ionic liquids, *Tribology Letters* (2008), vol. 31, no. 2, str. 107-118.
- [29] Feng Zhou, Yongmin Liang, Weimin Liu. Ionic liquid lubricants: designed chemistry for engineering applications. *Chemical Society Reviews* (2009), vol. 9, no. 38, str. 2590-2599.
- [30] Minami Ichiro. Ionic liquids in tribology. *Molecules* (2009), vol. 14, str. 2286-2305.
- [31] Chengfeng Ye, Weimin Liu, Yunxia Chen, Laigui Yu. Room-temperature ionic liquids: a novel versatile lubricant. *Chemical Communications* (2001), vol. 21, str. 2244-2245.
- [32] Jimenez Ana-Eva, Bermúdez María-Dolores. Ionic liquids as lubricants for steel aluminium contacts at low and elevated temperature. *Tribology Letters* (2007), vol. 26, str. 53-60.
- [33] Weimin Liu, Chengfeng Ye, Qingye Gong, Haizhong Wang, Peng Wang. Tribological performance of room-temperature ionic liquids as lubricant. *Tribology Letters* (2002), vol. 13, no. 2, str. 81-85.
- [34] Kondo Yuriko, Yagi Sotaro, Koyama Takahiro, Tsuboi Ryo, Sasaki Shinya. Lubricity and corrosiveness of ionic liquids for steel-on.steel sliding contacts. *Journal of Engineering Tribology* (2012), vol. 226, no. 11, str. 991-1006.
- [35] Yu Bo, Bansal Dinesh B., Qu Jun. Oil miscible and non-corrosive phosphonium-based ionic liquids as candidate lubricant additives. *Wear* (2012), vol. 289, str. 58-64.
- [36] Jiang Dong, Hu Litian, Feng Dapeng. Crown-type ionic liquids as lubricants for steel-on-steel system. *Tribology Letters* (2011), vol. 41, no. 2, str. 417-424.
- [37] Fox Malcolm, Priest Martin. Tribological properties of ionic liquids as lubricants and additives. Part 1: Synergistic tribofilm formation between ionic liquids and tricresyl phosphate. *Journal of Engineering Tribology* (2008), vol. 222, no. 3, str. 291-303.
- [38] Pejaković Vladimir, Kronberger Markus, Mahrova M., Vilas Miguel, Tojo Emilia, Kalin Mitjan. Pyrrollidinium sulfate and ammonium sulfate ionic liquids as lubricant additives for steel/steel contact lubrication. *Journal of Engineering Tribology* (2012), vol. 226, no. 11, str. 923-932.
- [39] Pejaković Vladimir, Kalin Mitjan, Vižintin Jože. 1 butyl-1 methylpyrrollidinium methyl sulfate ionic liquid as additive for glycerol in steel/steel contacts. V: Vižintin Jože (ur.), Velkavrh Igor (ur.), Podgornik Bojan (ur.). *Zbornik prispevkov posvetovanja Slotrib 2010, 25. november 2010, Ljubljana, Slovenija*. Ljubljana: Slovensko društvo za tribologijo, 2010, str. 109-117.
- [40] Lubricating oil compositions and uses. Prijava patenta: EP2126013 A1 (2008).

- [41] Zhang Liu, Feng Dapeng, Xu Bin. Tribological characteristics of alkylimidazolium diethyl phosphates ionic liquids as lubricants for steel-steel contact. *Tribology Letters* (2009), vol. 34, no. 2, str. 95-101.
- [42] Somers Anthony, Howlett Patrick, Sun J., MacFarlane Douglas, Forsyth Maria. Phosphonium ionic liquids as lubricants for aluminium-steel. *Tribology and Design* (2010), vol. 66, str. 273-283.
- [43] Shah Faiz Ullah, Glavatskikh Sergei, MacFarlane Douglas R., Somers Anthony, Forsyth Maria, Antzutkin Oleg N.. Novel halogen-free chelated orthoborate-phosphonium ionic liquids: synthesys and tribophysical properties. *Physical Chemistry Chemical Physics* (2011), no. 13, str. 12865-12873.
- [44] Somers Anthony, Howlet Patrick, Sun J., MacFarlane Douglas, Forsyth Maria. Transition in wear performance for ionic liquid lubricants under increasing load. *Tribology Letters* (2010), vol. 40, no. 2, str. 279-284.
- [45] Antzutkin Oleg, Shah Faiz Ullah, Glavatskikh Sergei. Ionic-liquid-based lubricants and lubrication additives comprising ions. Prijava patenta: WO2012128714 A1 (2012).
- [46] Totolin Vladimir, Minami Ichiro, Gabler Christoph, Doerr Nicole. Halogen-free borate ionic liquids as novel lubricants for tribological applications. *Tribology International* (2013), vol. 67, no. 11, str. 191-198.
- [47] Qu Jun, Truhan J., Dai Sheng, Luo Huimin, Blau P.J. Ionic liquids with ammonium cations as lubricants or additives. *Tribology Letters* (2006), vol. 22, no. 3, str. 207-214.
- [48] Zhu Liye, Chen Ligong, Xiang Shuo, Chen Guoxu, Yang Xin. Tribological properties of functionalized ionic liquids containing ester-group as lubricants for steel-steel system. *China Petroleum Processing and Petrochemical Technology* (2012), vol. 14, no. 2, str. 60-65.
- [49] Li X.F., Mu Z.G., Wang X.X., Zhang S.X., Liang Y.M., Zhou F. Tribological performance of ionic liquids bearing hydroxyl groups as lubricants in the aluminum-on-steel contacts. Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes (ICAMMP 2010), 6. – 8. November, 2010, Shenzhen, China, str. 1147-1153.
- [50] Li Dongmei, Cai Meirong, Feng Dapeng, Zhou Feng, Liu Weimin. Excellent lubrication performance and superior corrosion resistance of vinyl functionalized ionic liquid lubricants at elevated temperature. *Tribology International* (2011), vol. 44, no. 10, str. 1111-1117.
- [51] Qu Jun, Truhan J., Dai Sheng, Luo Huimin, Blau P.J. Ionic liquids with ammonium cations as lubricants or additives. *Tribology Letters* (2006), vol. 22, no. 3, str. 207-214.

- [52] Lawes S., Hainsworth S., Blake P., Ryder K., Abbott A. Lubrication of steel/steel contacts by choline chloride ionic liquids. *Tribology Letters* (2010), vol. 37, no. 2, str. 103-110.
- [53] Doerr Nicole, Gebeshuber Ille, Holzer Donat, Wanzenboeck Heinz. Evaluation of ionic liquid as lubricants. *Journal of Microengineering and Nanoelectronics* (2010), vol. 1, str. 29-34.
- [54] Reich Ronald, Stewart Patricia, Bohaychick John, Urbanski Julie. Base oil properties of ionic liquids. *Lubrication Engineering* (2003), vol. 59, no. 7, str. 16-21.
- [55] Predel Tim, Schlücker Eberhard. Ionic liquids in oxygen compression. *Chem. Eng. Technol.* (2009), vol 32, no. 8, str. 1183-1188.
- [56] Ionic liquids as engineering fluids [svetovni splet]. BASF. Dostopno na WWW: http://www.intermediates.bASF.com/chemicals/web/en/function/conversions:/publish/content/news-and-publications/brochures/download/BASF_Ionic_Liquids_Engineering_Fluids.pdf [08.11.2014].
- [57] Meihuan Yao, Yongmin Liang, Yanqiu Xia, Feng Zhou. Bisimidazolium ionic liquids as the high-performance antiwear additives in poly(ethylene glycol) for steel-steel contacts. *ACS Applied Materials&Interfaces* (2009), vol. 1, str. 467-471.
- [58] Schneider Ameneh, Brenner Josef, Tomastik Christian, Franek Friedrich. Capacity of selected ionic liquids as alternative EP/AW additive. *Lubrication Science* (2010), vol. 22. No. 6-7, str. 215-223.
- [59] Szarvas Laszlo, Gerhard Dirk, Volkholz Matthias, Volkholz Corvin. Salze von thiophosphorsäuren und deren verwendung in schmierstoffen. Prijava patenta: WO2011110423 A1 (2011).
- [60] Kamimura Hideto, Kubo Tomoo, Minami Ichiro, Mori Shigeyuki. Effect and mechanism of additives for ionic liquids as new lubricants. *Tribology International* (2007), vol. 40, no. 4, str. 620-625.
- [61] Bartels Thorsten, Hänsel Rene, Schwab Peter, Seidensticker Peter. Verwendung von alkoxylierten Phosphatsäureestern als Verschleißschutzadditiv für den Einsatz in ionischen Flüssigkeiten als Schmierstoff. Prijava patenta: DE102010001070 A1 (2010).
- [62] Alemany Aurelie, Gerhard Dirk, Urtel Bolette. Ionic liquids with a content of ionic polymers. Prijava patenta: WO 2012/016835 A2 (2012).
- [63] Lovrec Darko. Possible use of ionic liquids as a technical fluid. V: Kudlaček Jan (ur.), Pepelnjak Tomaž (ur.). *International Conference on Innovative Technologies:*

proceedings IN-TECH 2011, 01.-03.september 2011, Bratislava, Slovakia, 2011, str. 100-103.

- [64] Stachowiak W. Gwidon, Batchelor W. Andrew. *Engineering Tribology, 2nd edition*, Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 0-7506-7304-4.
- [65] Quintolubric® [svetovni splet]. Quaker Chemical Corp. Dostopno na WWW: <http://www.quintolubric.com/> [08.11.2014].
- [66] Krüss [svetovni splet]. Krüss GmbH-Deutschland. Dostopno na WWW: <http://www.kruss.de/de/service/schulung-theorie/glossar/kontaktwinkel/> [07.11.2014].
- [67] Mitjan Kalin, Marko Polajnar, The correlation between the surface energy, the contact angle and the spreading parameter, and their relevance for the wetting behaviour of DLC with lubricating oils. *Tribology International* (2013), vol. 66. str. 225-233.
- [68] Mitjan Kalin, Marko Polajnar. The wetting of steel, DLC coatings, ceramics and polymers with oils and water: The importance and correlations of surface energy, surface tension, contact angle and spreading. *Applied Surface Science* (2014), vol. 293, str. 97-108.
- [69] Kambič Milan, Kalb Roland. Comparison of ionic liquids with conventional mineral oils. V: Lovrec Darko (ur.), Tič Vito (ur.). *Zbornik prispevkov Mednarodne konference Fluidna tehnika 2013, 19. in 20. september 2013, Kongresni center Habakuk, Maribor, Slovenija*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2011, str. 61-70.
- [70] Lovrec Darko, Tašner Tadej. Hidravlične tekočine z višjim modulom stisljivosti in vpliv na delovanje hidravlične naprave. V: Lovrec Darko (ur.), Tič Vito (ur.). *Zbornik prispevkov Mednarodne konference Fluidna tehnika 2011, 15. in 16. september 2011, Kongresni center Habakuk, Maribor, Slovenija*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2011, str. 201-216.
- [71] Murrenhoff Hubertus. *Grundlagen der Fluidtechnik, Teil 1 : Hydraulik, Umdruck zur Vorlesung*. Aachen : IFAS-RWTH, 2005.
- [72] Lovrec Darko, Hribernik Drago, Kiker Edvard. Model of electro-hydraulic pressure control—the basis for drive design and optimisation. *Ventil* (2002), vol. 8, no. 3, str. 151-161.
- [73] Lovrec Darko, Faber F. Electrohydraulic pressure control by a self-adjusting proportional derivative controller. *Experimental Techniques* (2006), vol. 30, no. 3, str. 57-63.
- [74] Milan Kambic, Roland Kalb, Tadej Tašner, Darko Lovrec. High bulk modulus of ionic liquid and effects on performance of hydraulic sistem. *The Scientific World Journal*

- (2014), vol. 2014. [svetovni splet]. Dostopno na WWW:
<http://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/504762/> [17.10.2014].
- [75] *PCB Piezotronics* [svetovni splet]. Model 102B Specification. Dostopno na WWW:
<http://wwwpcb.com/Products.aspx?m=102B> [09.11.2014].
- [76] *WIKA* [svetovni splet]. Dostopno na WWW:
http://en-co.wika.de/upload/DS_PE8166_GB_1614.pdf [09.11.2014].
- [77] *KERN: Technical Datasheet KERN PCB 6000-1.* *KERN & SOHN GmbH.* [svetovni splet]. Dostopno na WWW: <http://www.kern-sohn.com/en/shop/proddata-3916.html> [09.11.2014].
- [78] *PRECIZ.si: Kern--pcb.* *PRECIZ.si.* [svetovni splet]. Tehnica KERN PCB 6000-1. Dostopno na WWW: <http://www.preciz.si/trgovina/tehnica/828/kategorija/45/kern--pcb> [09.11.2014].
- [79] *National Instrument.* [svetovni splet]. Operating instructions and specifications NI9234. Dostopno na WWW: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374238c.pdf> [09.11.2014].

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Shematski prikaz razvoja hidravličnih tekočin	11
Slika 3.1: Osnovne strukture kationov in anionov v ionskih tekočinah [10]	15
Slika 3.2: Potencialna področja uporabe ionskih tekočin [23]	24
Slika 4.1: Določevanje plamenišča v odprti posodi	36
Slika 4.2: Določevanje plamenišča v zaprti posodi	37
Slika 4.3: Aparat za določanje gostote Mettler Toledo DE 40	40
Slika 4.4: Določanje indeksa viskoznosti [64]	43
Slika 4.5: Etalon za določevanje korozivnosti na baker	47
Slika 4.6: Aparatura za izvajanje testa penjenja	51
Slika 4.7: a), b) Princip meritve točke zavaritve, c) štiri-krogelni aparat Hansa Press	53
Slika 4.8: Združljivost ionskih tekočin in mineralnega olja s celuloznim filtrskim elementom	59
Slika 4.9: Združljivost ionskih tekočin in mineralnega olja s celuloznim filtrirnim papirjem	61
Slika 4.10: Združljivost IL-17PI045 s celuloznim filtrirnim papirjem	61
Slika 4.11: Združljivost EMIM-EtSO ₄ in Hydrolubric VG 46 s celuloznim filtrirnim papirjem	62
Slika 4.12: Združljivost EMIM-EtSO ₄ in Hydrolubric VG 46 s celuloznim filtrirnim papirjem	62
Slika 4.13: Test združljivosti z barvnimi premazi	63
Slika 4.14: Ionska tekočina IL-17PI045 in lakirana pločevina	64
Slika 4.15: Stribeckova krivulja in vplivne veličine na kvaliteto mazanja	65
Slika 4.16: MTM naprava: med testom (levo), fotografiranje kontaktne površine (desno)	66
Slika 4.17: Izmerjene Stribeckove krivulje	67
Slika 4.18: IL-17PI045 - Površina diskov po meritvah Stribeckove krivulje	69
Slika 4.19: Površina diskov po meritvah Stribeckove krivulje	70
Slika 4.20: Instrument Megger OTS 60PB	73
Slika 4.21: Kontaktni kot in sposobnost omočenja na različnih materialih [66]	74
Slika 4.22: Shematična predstavitev kontaktnega kota [66]	75
Slika 4.23: Stereomikroskop Zeiss Jena	76
Slika 4.24: Kontaktni kot za IL-17PI045	77
Slika 4.25: Kontaktni kot za EMIM-EtSO ₄	77

Slika 4.26: Kontaktni kot Hydrolubric VG 46	78
Slika 4.27: Kontaktni kot Quintolubric 888-68	78
Slika 4.28: Mazalne lastnosti ionskih tekočin v primerjavi z mineralnim oljem.....	80
Slika 4.29: Test penjenja - sekvenca III po končanem vpihanjanu zraka	81
Slika 4.30: Test penjenja - sekvenca III, 10 min po končanem vpihanjanu zraka	81
Slika 5.1: Test v vlažni komori po 3,5 h; 18PI163 (TOMA-DBP+40 % NMP).....	87
Slika 5.2: Test v vlažni komori po 24,5 h; 18PI163 (TOMA-DBP+40 % NMP).....	87
Slika 5.3: Test v vlažni komori po 24 h; IL-17PI045	88
Slika 5.4: Test v vlažni komori po 4 dneh; IL-17PI045.....	89
Slika 5.5: Test v vlažni komori po 27 h; 17PI064 (TOMA-DBP+7 % H ₂ O)	89
Slika 5.6: Izvajanje testa korozivnosti na baker.....	90
Slika 5.7: Določanje korozivnosti na baker za IL-17PI045	90
Slika 5.8: Test korozije na zraku EMIM-EtSO ₄ po 4 dneh.....	91
Slika 5.9: Vzorci delov hidravličnih ventilov	93
Slika 5.10: Vzorci hidravličnih ventilov pred začetkom namakanja	94
Slika 5.11: Vzorci hidravličnih ventilov med testom združljivosti z ionsko tekočino	94
Slika 5.12: Test namakanja v EMIM-EtSO ₄ po 90 dneh; pozicija 5.....	95
Slika 6.1: Graf tlaka v odvisnosti od skrčka	98
Slika 6.2: Simuliran in realni skočni odziv cevovoda dolžine l=35 m [72].....	103
Slika 6.3: Primerjava odzivov za mineralno olje in tekočino z višjim modulom stisljivosti.	103
Slika 6.4: Hidravlični valj napolnjen s tekočino	105
Slika 6.5: Splošni model hidrostatične enote in delovni diagram [70]	106
Slika 6.6: Vpliv modula stisljivosti K na dinamiko regulacije tlaka	108
Slika 6.7: Stoječe valovanje v obojestransko zaprti cevi	112
Slika 6.8: Naprava za merjenje stisljivosti.....	113
Slika 6.9: Prečni prerez dela naprave za merjenje stisljivosti.....	114
Slika 6.10: Hitri tlačni senzor Piezotronics PCB 102B (levo) in nameščen v hidravlični priključek (desno) [75].....	115
Slika 6.11: Digitalni prikazovalnik tlaka WIKA DG-10-S	116
Slika 6.12: Tehnica KERN PCB 6000-1 [78]	117
Slika 6.13: Krmilnik Compact RIO – srce krmilnika (levo), IEPE modul (desno)	118
Slika 6.14: Modul stisljivosti ionske tekočine EMIM-EtSO ₄	125
Slika 6.15: Statistično obdelani podatki stisljivosti ionske tekočine EMIM-EtSO ₄	126
Slika 6.16: Izmerjen modul stisljivosti različnih tekočin v odvisnosti od tlaka	126

Slika 6.17: Izmerjena stisljivost tekočin v odvisnosti od tlaka 127

Slika 6.18: Rja na čepu zaradi reakcije z ionsko tekočino 129

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Viskoznost v odvisnosti od pogojev uporabe [6]	13
Preglednica 3.1: Stisljivost ionskih tekočin v primerjavi z vodo in klasičnim hidravličnim oljem [14]	19
Preglednica 4.1: Merilno območje posameznih viskozimetrov.....	42
Preglednica 4.2: Vrste atmosfere pri testih korozije v vlažni komori	45
Preglednica 4.3: Način podajanja rezultatov testa penjenja po ASTM D 892	52
Preglednica 4.4: Sposobnost filtracije za Quintolubric 888-46 in Quintolubric 888-68.....	58
Preglednica 4.5: Prebojna napetost ionskih tekočin in mineralnega hidravličnega olja	73
Preglednica 4.6: Izmerjeni kontaktni koti.....	77
Preglednica 4.7: Rezultati primerjalnih meritev za EMIM-EtSO ₄	79
Preglednica 4.8: Primerjalni rezultati testa penjenja	80
Preglednica 5.1: Primerjava nekaterih fizikalno kemijskih lastnosti	86
Preglednica 6.1: Pomembnejši karakteristični podatki naprave za merjenje stisljivosti	113
Preglednica 6.2: Podatki za hitra senzorja [75]	115
Preglednica 6.3: Podatki digitalnega prikazovalnika WIKA DG-10-S [76]	116
Preglednica 6.4: Podatki tehtnice KERN PCB 6000-1 [77].....	117
Preglednica 6.5: Podatki IEPE modula – NI9234 [79].....	118
Preglednica 6.6: Absolutne in relativne napake vrednosti, ki se ne spreminjajo	123
Preglednica 6.7: Absolutne in relativne napake spremenljivk	123
Preglednica 6.8: Absolutne in relativne napake meritve stisljivosti ionske tekočine EMIM-EtSO ₄ za eno merilno točko	124
Preglednica 6.9: Izmerjen modul stisljivosti	127
Preglednica 6.10: Izmerjena stisljivost.....	128

OSEBNA BIBLIOGRAFIJA

MILAN KAMBIČ [01163]

Osebna bibliografija za obdobje 1986-2014 (November)

ČLANKI IN DRUGI SESTAVNI DELI

1.01 Izvirni znanstveni članek

1. KAMBIČ, Milan, KALB, Roland, TAŠNER, Tadej, LOVREC, Darko. High Bulk Modulus of Ionic Liquid and Effects on Performance of Hydraulic System. The scientific world journal, ISSN 1537-744X, Research Article, vol. 2014, 10 str. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/504762>, doi: 10.1155/2014/504762. [COBISS.SI-ID 17429014]
2. TIČ, Vito, KAMBIČ, Milan. Montaža in umerjanje on-line senzorjev za nadzor stanja olja. Ventil, ISSN 1318-7279, 2014, letn. 20, št. 4, str. 288-293. [COBISS.SI-ID 18056726]
3. KAMBIČ, Milan, KALB, Roland. Corrosion and lubrication properties of some ionic liquids. Ventil, ISSN 1318-7279, okt. 2013, letn. 19, št. 5, str. 364-368, ilustr. [COBISS.SI-ID 13223963]
4. VIŽINTIN, Jože, KAMBIČ, Milan, LIPUŠČEK, Igor, HUDNIK, Vida. Application of wear particle analysis to condition monitoring of rotating machinery in iron and steel works. Lubrication engineering, ISSN 0024-7154, 1995, let. 51, št. 5, str. 389-393. [COBISS.SI-ID 1897499]

1.04 Strokovni članek

5. KAMBIČ, Milan. Proizvodnja hidravličnega olja boljše stopnje čistosti. Ventil, ISSN 1318-7279, feb. 2013, letn. 19, št. 1, str. 56-60, ilustr. [COBISS.SI-ID 12722971]
6. KAMBIČ, Milan, LOVREC, Darko. Ionske tekočine - hidravlične tekočine prihodnosti. Ventil, ISSN 1318-7279, feb. 2012, letn. 18, št. 1, str. 56-[60], ilustr. [COBISS.SI-ID 12243995]

7. KAMBIČ, Milan, LOVREC, Darko. Pregled stanja uporabe hidravličnih tekočin. Ventil, ISSN 1318-7279, dec. 2011, letn. 17, št. 6, str. 516-520. <http://www.revija-ventil.si/znanstveni-in-strokovni-clanki/?id=48>. [COBISS.SI-ID 15711510]
8. KAMBIČ, Milan, LOVREC, Darko. Idealna hidravlična tekočina. Vzdrževalec, ISSN 1318-2625, dec. 2011, št. 144, str. 18-21. [COBISS.SI-ID 15711766]
9. KAMBIČ, Milan. 17. mednarodni kolokvij - Solving Friction and Wear Problems (Reševanje problemov trenja in obrabe). Ventil, ISSN 1318-7279, feb. 2010, letn. 16, št. 1, str. 70-72. [COBISS.SI-ID 14016534]
10. LOVREC, Darko, KAMBIČ, Milan. Primerno skladiščenje hidravličnih tekočin. IRT 3000, ISSN 1854-3669, jun. 2008, letn. 3, št. 15, str. 80-81. [COBISS.SI-ID 12401174]
11. KAMBIČ, Milan, KUS, Branko, BROEKHOF, Nico. Razvoj manj nevarne in okolju bolj prijazne HFA-tekočine in njena praktična uporaba v Premogovniku Velenje = The development and use of less hazardous and more environmentally friendly HFA fluids and their practical application in Slovenian coal mining. Ventil, ISSN 1318-7279, 2008, letn. 14, št. 1, str. 44-50. [COBISS.SI-ID 10397211]
12. KAMBIČ, Milan, HROBAT, Aleš. Spremljanje kontaminacije hidravličnih tekočin : pogled v zakulisje - določanje vrste, količine in izvora kontaminantov. Ventil, ISSN 1318-7279, 2007, let. 13, št. 6, str. 414-418. [COBISS.SI-ID 10335003]
13. KAMBIČ, Milan. Filtracijska sposobnost hidravličnih tekočin = The filterability of hydraulic fluids. Ventil, ISSN 1318-7279, dec. 2002, letn. 8, št. 4, str. 216-218. [COBISS.SI-ID 5530139]
14. KERSNIK, Mitja, KAMBIČ, Milan, MAJERIČ, Ivan. Primerjalne meritve stopnje čistosti hidravličnega olja = [Comparative measurements of cleanliness level of hydraulic oil]. Ventil, ISSN 1318-7279, 1998, let. 4, št. 4, str. 206-209. [COBISS.SI-ID 3107611]
15. KAMBIČ, Milan, MAJERIČ, Ivan, KERSNIK, M. Primerjalne meritve stopnje čistosti hidravličnega olja. Vzdrževalec, ISSN 1318-2625, dec. 1998, št. 66, str. 22-24, ilustr. [COBISS.SI-ID 104594944]

16. KAMBIČ, Milan. Vpliv vode na olja. Ventil, ISSN 1318-7279, 1996, let. 2, št. 3, str. 130-132. [COBISS.SI-ID 3127579]
17. KAMBIČ, Milan, KUS, Brane. Masti za mazanje. Vzdrževalec, ISSN 1318-2625, feb. 1996, št. 51, str. 30-31, apr. 1996, št. 52, str. 40-41. [COBISS.SI-ID 103461888]
18. KAMBIČ, Milan. Ukrepi za zaščito kože pri uporabi maziv. Vzdrževalec, ISSN 1318-2625, dec. 1996, št. 55, str. 26-27. [COBISS.SI-ID 13357078]
19. KAMBIČ, Milan. Pomen prepoznavanja tipa obrambnih delcev. Vzdrževalec, ISSN 1318-2625, dec. 1995, št. 50, str. 16-17. [COBISS.SI-ID 13357334]

1.05 Poljudni članek

20. TIČ, Vito, LOVREC, Darko, KAMBIČ, Milan. Nadzorni sistemi sodobnih hidravličnih agregatov : proizvajalci so prisiljeni v svoje sisteme vodenja vključevati tudi sistem za nadzor stanja. Finance, ISSN 1318-1548, 6. jul. 2009, št. 127/3022, pril. str. 29, ilustr. [COBISS.SI-ID 13628694]

1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci

21. KAMBIČ, Milan, KALB, Roland. Comparison of ionic liquids with conventional mineral oils. V: LOVREC, Darko (ur.), TIČ, Vito (ur.). Proceedings of International Conference Fluid Power 2013, 19th-20th September 2013, Congress centre Habakuk, Maribor, Slovenia. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2013, str. 61-70, graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 17177110]
22. KAMBIČ, Milan, LOVREC, Darko. Hidravlične tekočine prihodnosti : na poti iskanja idealne hidravlične tekočine. V: LOVREC, Darko (ur.), TIČ, Vito (ur.). Zbornik prispevkov Mednarodne konference Fluidna tehnika 2011, 15. in 16. september 2011, Kongresni center Habakuk, Maribor, Slovenija. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2011, str. 149-162. [COBISS.SI-ID 15347478]
23. TIČ, Vito, KAMBIČ, Milan, LOVREC, Darko. Application of condition monitoring system for mineral oils. V: International Scientific Conference Management of Technology Step to Sustainable Production, MOTSP 2010, 2-4 June 2010, Rovinj, Croatia. ĆOSIĆ, Predrag (ur.), BARIĆ, Gordana (ur.), ĐUKIĆ, Goran (ur.). MOTSP 2010 : Management of technology step to sustainable production : conference proceedings. Zagreb: Faculty of

Mechanical Engineering and Naval Architecture, cop. 2010, [8] str., ilustr. [COBISS.SI-ID 14175254]

24. TIČ, Vito, KAMBIČ, Milan, LOVREC, Darko. Uporabnost sistemov za on-line spremljanje stanja hidravličnih olj. V: VIŽINTIN, Jože (ur.), VELKAVRH, Igor (ur.), PODGORNIK, Bojan (ur.). Zbornik predavanj Posvetovanja o tribologiji, mazivih in alternativnih gorivih = Proceedings of the Conference on Tribology, Lubricants and Alternative Fuels. Ljubljana: Slovensko društvo za tribologijo: = Slovenian Society for Tribology, 2010, str. 227-240, graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 14726422]
25. KAMBIČ, Milan, TIČ, Vito, LOVREC, Darko. Mehanizmi spremenjanja in on-line nadzor stanja hidravlične tekočine. V: KASTREVC, Mitja (ur.), LOVREC, Darko (ur.). Zbornik prispevkov Mednarodne konference Fluidna tehnika 2009, 17. in 18. september 2009, Kongresni center Habakuk, Maribor, Slovenija. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2009, str. 103-116. [COBISS.SI-ID 13441558]
26. TIČ, Vito, LOVREC, Darko, KAMBIČ, Milan. Nadzorni sistemi sodobnih hidravličnih agregatov. V: 18. Mednarodno posvetovanje Komunalna energetika, 12. do 14. maj 2009, Maribor, Slovenija. VORŠIČ, Jože (ur.). Zbornik = Proceedings. Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 2009, str. 1-10. [COBISS.SI-ID 13350166]
27. KAMBIČ, Milan, LOVREC, Darko, TIČ, Vito. Zmanjšanje vpliva maziv na okolje. V: 18. Mednarodno posvetovanje Komunalna energetika, 12. do 14. maj 2009, Maribor, Slovenija. VORŠIČ, Jože (ur.). Zbornik = Proceedings. Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 2009, str. 1-11. [COBISS.SI-ID 13349398]
28. KAMBIČ, Milan, KUS, Branko, HROBAT, Aleš. Spremljanje motornega olja v stacionarnem plinskem motorju. V: Posvetovanje o pogonskih in alternativnih gorivih, tribologiji in ekologiji, Ljubljana, Slovenija, 14. november 2006 = Conference on Fuels, Tribology and Ecology, Ljubljana, Slovenia, 2006. VIŽINTIN, Jože (ur.), BEDENK, Janez (ur.), KALIN, Mitjan (ur.). Zbornik predavanj Posvetovanja o pogonskih in alternativnih gorivih, tribologiji in ekologiji = Proceedings of the Conference on Fuels, Tribology and Ecology. Ljubljana: Slovensko društvo za tribologijo: = Slovenian Society for Tribology, 2006, str. 71-82. [COBISS.SI-ID 13358614]

29. KUS, Branko, KAMBIČ, Milan. Razvojni trendi na področju maziv in hladilnih tekočin. V: VIŽINTIN, Jože (ur.), BEDENK, Janez (ur.), PODGORNIK, Bojan (ur.). SLOTTRIB '02 : zbornik predavanj Posvetovanja o pogonskih in alternativnih gorivih, tribologiji in ekologiji, Portorož, Slovenija, 21.-22. november 2002 = proceedings of the Conference on Fuels, Tribology and Ecology, Portorož, Slovenia, November 21-22, 2002. Ljubljana: Slovensko društvo za tribologijo: = Slovenian Society of Tribology, 2002, str. 3-12. [COBISS.SI-ID 13358358]
30. KAMBIČ, Milan, KUS, Branko, VIDMAR, Ljuba. Stopnja čistosti svežih hidravličnih olj. V: SLOTTRIB '98. VIŽINTIN, Jože (ur.), BEDENK, Janez (ur.). Zbornik predavanj Mednarodne konference o tribologiji, Gozd Martuljek, Slovenija, 18. - 19. november 1998 = Proceedings of the International Conference on Tribology, Gozd Martuljek, Slovenia, November 18 - 19, 1998. Ljubljana: Slovensko društvo za tribologijo: = Slovenian Society of Tribology, 1998, str. 195-203. [COBISS.SI-ID 13358102]

1.09 Objavljeni strokovni prispevek na konferenci

31. TIČ, Vito, KAMBIČ, Milan. On-line nadzor stanja maziv. V: 6. industrijski forum IRT, Portorož, 9.-11. junij 2014. ŠVETAK, Darko (ur.). Vir znanja in izkušenj za stroko : zbornik foruma. Škofljica: Profidtp, 2014, str. 151-157, ilustr. [COBISS.SI-ID 17934870]
32. KAMBIČ, Milan, LOVREC, Darko, TIČ, Vito. Sodobne metode spremljanja stanja hidravličnih tekočin. V: VIŽINTIN, Jože (ur.), KRŽAN, Boris (ur.), PODGORNIK, Bojan (ur.). Zbornik predavanj Posvetovanja o tehnični diagnostiki, mazivih in alternativnih gorivih = Proceedings of the Conference on Technical Diagnostics, Lubricants and Fuels. Ljubljana: Slovensko društvo za tribologijo: = Slovenian Society for Tribology, 2008, str. 93-103. [COBISS.SI-ID 12785942]
33. KAMBIČ, Milan. Meritve stopnje čistosti hidravličnih olj z avtomatskimi števci delcev. V: LOVREC, Darko (ur.). Zbornik prispevkov strokovne konference Fluidna tehnika 2001 - aplikativna hidravlika, 28. september 2001, Maribor, Slovenija. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2001, str. 153-160. [COBISS.SI-ID 13357846]
34. KAMBIČ, Milan. Mazanje zobniških prenosnikov. V: 7. srečanje vzdrževalcev Slovenije, Rogla, 16.-18. oktober 1997. DREO, Zlatka (ur.). Zbornik, (Vzdrževalec, ISSN 1318-2625,

izredna št. 4). Slovenska Bistrica: Društvo vzdrževalcev Slovenije, [1997], str. 39-41. [COBISS.SI-ID 13357590]

35. KAMBIČ, Milan. Praktična uporaba hladilno mazalnih sredstev. V: 5. srečanje vzdrževalcev Slovenije, Rogla, 11.-13. oktober '95. Zbornik, (Posebna izdaja revije Vzdrževalec). Slovenska Bistrica: Društvo vzdrževalcev Slovenije, [1995], str. 65-70. [COBISS.SI-ID 13358870]

36. HROBAT, Boris, KRUMPIČ, Avgust, KAMBIČ, Milan, GORJANC, Uroš. Pregled hladilno mazalnih sredstev po sestavi in uporabi. V: Tehniško posvetovanje 4. srečanje vzdrževalcev Slovenije, 12.-13. oktober 1994. Zbornik : Društvo vzdrževalcev Slovenije. Posebna izd. Slovenska Bistrica: Društvo vzdrževalcev Slovenije, [1994], str. 55-60. [COBISS.SI-ID 13356822]

1.17 Samostojni strokovni sestavek ali poglavje v monografski publikaciji

37. LOVREC, Darko, KAMBIČ, Milan. Maintenance management, Contamination monitoring of hydraulic fluids - better insight using XRF. V: Guide to maintenance management, (A Leonardo da Vinci project, EuroMaint). Gent: Hogeschool Utrecht; Brussels: European Federatioon of National Maintenance Societies Vzw., cop. 2008, str. 56-58. [COBISS.SI-ID 12865814]

38. ULAGA, Samo, KAMBIČ, Milan. Academic skills, personal skills and social competencies, Systematic approach to condition based maintenance. V: Guide to maintenance management, (A Leonardo da Vinci project, EuroMaint). Gent: Hogeschool Utrecht; Brussels: European Federatioon of National Maintenance Societies Vzw., cop. 2008, str. 89-94. [COBISS.SI-ID 12866070]

MONOGRAFIJE IN DRUGA ZAKLJUČENA DELA

2.02 Strokovna monografija

39. LOVREC, Darko, KAMBIČ, Milan. Hidravlične tekočine in njihova nega. 1. izd. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2007. 184 str., ilustr. ISBN 978-961-248-039-4. [COBISS.SI-ID 59173377]

2.09 Magistrsko delo

40. KAMBIČ, Milan. Raziskava triboloških okvar na pogonskih in delovnih strojih = [Investigation of tribological failures on driving machines] : magisterij, (Fakulteta z astrojništvo, Ljubljana, Magistrska dela). Jesenice: [M. Kambič], 1992. IX, 81 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 30573056]

2.11 Diplomsko delo

41. KAMBIČ, Milan. Oblikovanje aksialnega ventilatorja ter vpliv lopatic na karakteristiko : diplomska naloga visokošolskega študija. Ljubljana: [M. Kambič], 1986. 128 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 12667931]

SEKUNDARNO AVTORSTVO**Prevajalec**

42. KNECHT, Ronald. HFC-E: Super glikol. Ventil, ISSN 1318-7279, okt. 2009, letn. 15, št. 5, str. 450-452, ilustr., dec. 2009, letn. 15, št. 6, str. 540-542, ilustr. [COBISS.SI-ID 11154971]

Oseba, ki intervjuva

43. KNECHT, Ronald (intervjuvanec). Ronald Knecht, produktni vodja oddelka Fluid Power Europe v podjetju Quaker. Ventil, ISSN 1318-7279, jun. 2009, letn. 15, št. 3, str. 200-202. [COBISS.SI-ID 13333014]

44. CRISTOPHE, Peuchot (intervjuvanec). Kontaminacija, filtracija in standardizacija na področju fluidne tehnike. Ventil, ISSN 1318-7279, 2009, letn. 15, št. 6, str. 484-487, ilustr. [COBISS.SI-ID 11347739]

45. THEISSEN, Heinrich (intervjuvanec). Dr.-Ing. Heinrich Theissen, projektni vodja programa uvajanja bioolj v Nemčiji. Ventil, ISSN 1318-7279, 2008, letn. 14, št. 1, str. 24-26. [COBISS.SI-ID 10398491]

NERAZPOREJENO

46. KAMBIČ, Milan. Hidravlične tekočine - kontaminacija, filterabilnost, filtriranje. Vzdrževalec, ISSN 1318-2625, okt. 2002, št. 89, str. 18-22, ilustr. [COBISS.SI-ID 128050688]

47. KAMBIČ, Milan, VIŽINTIN, Jože, HUDNIK, Vida, LIPUŠČEK, Igor. Spremljanje obrabe elementov strojev z analizo obrabnih delcev. Strojniški vestnik, ISSN 0039-2480, 37, št. 10/12 (1991), str. 219-222 = Tribologija. - 8, št.10/12 (1991), str. TR 1-TR 4. Ilustr. [COBISS.SI-ID 46086912]

Izpis bibliografskih enot: vse bibliografske enote

Izbrani format bibliografske enote: ISO 690

Razvrščanje bibliografskih enot: tipologija, leto - padajoče, naslov

Vir bibliografskih zapisov: Vzajemna baza podatkov COBISS.SI/COBIB.SI, 9. 11. 2014

ŽIVLJENJEPIS

OSEBNI PODATKI

ime in priimek:	Milan Kambič
izobrazba:	Magister znanosti s področja strojništva
datum in kraj rojstva:	28. 03. 1962, Jesenice
naslov:	Hlebce 41, 4248 Lesce
državljanstvo:	slovensko
vozniški izpit (kategorije):	A, B, G, H
elektronski naslov:	milan.kambic@olma.si

IZOBRAŽEVANJE

podiplomski študij:	Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
področje:	Konstrukcijsko mehansko področje
izobraževanje:	Magistrski študij
izobrazba:	Magister znanosti s področja strojništva (27.05.1992)
naslov zaključnega dela:	Raziskava triboloških okvar na pogonskih in delovnih strojih
dodiplomski študij:	Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
modul:	Hidravlični stroji
izobrazba:	Diplomirani inženir strojništva (27.03.1987)
naslov zaključnega dela:	Oblikovanje aksialnega ventilatorja ter vpliv lopatic na karakteristiko
srednja šola:	Tehniška metalurška in strojna šola, Jesenice
izobrazba:	Strojni tehnik (25.06.1981)
osnovna šola:	Osnovna šola Koroška Bela, Jesenice (15.06.1977)

DELOVNE IZKUŠNJE

podjetje: Železarna Jesenice/Acroni d.o.o.

delovno mesto: Inženir za tribologijo

obdobje: 1987 – 1993

podjetje: Olma d.d., Ljubljana

delovno mesto: Komercialno tehnični predstavnik, Strokovni sodelavec za maziva in informatiko, Direktor tehnične službe

obdobje: 1993 – sedaj

ZNANJE TUJIH JEZIKOV

angleščina	Berlitz (stopnja 6 in stopnja 7) razumevanje C1, govorjenje B2, pisanje B2
nemščina	Izobraževalni center za tuj jezike Ljubljana (stopnja 1, 2, 3, 4, 5) razumevanje C1, govorjenje C1, pisanje C1
hrvaščina	razumevanje C1, govorjenje C1, pisanje C1
bosanščina	razumevanje C1, govorjenje C1, pisanje C1
srbščina	razumevanje C1, govorjenje C1, pisanje C1

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

IZJAVA DOKTORSKEGA KANDIDATA

Podpisani Milan Kambič, vpisna številka 95028113

izjavljam,

da je doktorska disertacija z naslovom: **Raziskava primernosti ionskih tekočin za uporabo v hidravličnih sistemih**

- rezultat lastnega raziskovalnega dela,
- da predložena disertacija v celoti ali v delih ni bila predložena za pridobitev kakršnekoli izobrazbe po študijskem programu druge fakultete ali univerze,
- da so rezultati korektno navedeni in
- da nisem kršil-a avtorskih pravic in intelektualne lastnine drugih.

Maribor, 20.03.2015

Podpis: _____