

Vpliv viskoznosti nosilne tekočine na izgube magnetne tekočine v izmeničnem magnetnem polju

Jakob Vizjak, Miloš Beković in Anton Hamler

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

E-pošta: jakob.vizjak1@um.si

Influence of carrier fluid viscosity on magnetic fluid losses in an alternating magnetic field

Abstract. In magnetic fluids, different carrier fluids have different viscosities. The result is differences in magnetic fluid losses when exposed to an alternating magnetic field. Differences in losses due to various viscosities are theoretically evaluated using a mathematical model that is based on relaxation losses, which are the result of Brownian and Néel relaxation. It is found that fluids with lower viscosity show higher losses compared to fluids with higher viscosities. Furthermore, the change in losses is small in comparison to change in losses when other parameters are changed, such as magnetic field amplitude or volume fraction of magnetic nanoparticles.

1 Uvod

Magnetne tekočine so suspenzija¹ magnetnih nanodelcev v nosilni tekočini. Pod vplivom magnetnega polja, takšna tekočina izkazuje magnetne lastnosti.

Magnetna tekočina je sestavljena iz nosilne tekočine, kot je na primer voda, kerozin ali pa kakšno olje. V nosilni tekočini se nahajajo magnetni nanodelci velikosti 3 – 15 nm [1]. Običajno se za nanodelce uporablja železove okside, kot so na primer magnetit (Fe_3O_4), hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ali maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), uporabljajo se pa tudi druge magnetne spojine [2]. Pomembno za te delce je, da so dovolj majhni, da imajo samo eno magnetno domeno, saj takrat izkazujejo superparamagnetno obnašanje. Za boljšo stabilnost proti aglomeraciji² se delce prevleče s surfaktantom³, ki mora biti izbran tako, da se ujema z dielektričnimi lastnostmi nosilne tekočine. Za to je pogosta uporaba oleinske kisline [3].

Magnetne tekočine se uporabljajo v tehniki, na primer za dinamično tesnjenje rotirajočih teles (trdi diski). Prav tako se uporabljajo v medicini, za ciljno doziranje zdravil ali pa za hipertermično segrevanje rakavega tkiva.

V primeru hipertermične aplikacije so pomembne grelne lastnosti magnetne tekočine. Te so povezane z močjo izgub v časovno odvisnem magnetnem polju, saj je stopnja gretja višja, kadar so višje izgube. Na izgube vplivajo različni parametri, kot so na primer jakost magnetnega polja, frekvenca, volumska koncentracija

magnetnih delcev. Med te parametre spada tudi viskoznost. Zato smo teoretično ovrednotili vpliv nosilnih tekočin, ki imajo različne viskoznosti na moč izgub [4].

2 Metode in materiali

2.1 Matematični model izračuna izgub

Izhajali smo iz relaksacijskih⁴ izgub magnetne tekočine v časovno spreminjajočem se magnetnem polju. Za izračun izgub, smo uporabili enak model, kot je bil uporabljen v [5], kjer so ugotovili dobro ujemanje tega modela z meritvami po kalorimetrični metodi.

Izhajali smo iz skupnega relaksacijskega časa τ :

$$\tau^{-1} = \tau_B^{-1} + \tau_N^{-1} \quad (1)$$

Ta čas je sestavljen iz dveh delov. Prvi je Brownov relaksacijski čas τ_B , ki ga opisuje enačba (2), drugi je Néelov relaksacijski čas, ki ga opisuje enačba (3) [5].

$$\tau_B = \frac{3V_h\eta}{k_B T}, \quad (2)$$

$$\tau_N = \tau_0 e^{\frac{K_a V_p}{k_B T}}. \quad (3)$$

Pri tem je η viskoznost, V_h je hidrodinamični volumen delca s surfaktantom, k_B je Boltzmannova konstanta, T je temperatura, K_a je konstanta anizotropije, V_p je volumen magnetnega delca in $\tau_0 = 10^{-9}$ s je eksponentni faktor. Skupni relaksacijski čas nastopa v magnetizaciji tekočine $\mathbf{M}$, ki se za posamično komponento x in y zapiše kot:

$$\hat{M}_i = \chi_i \frac{\hat{h}_i}{j\omega\tau + 1}, \quad (4)$$

kjer je i indeks, ki označuje posamično komponento, $\omega = 2\pi f$ je frekvenca magnetnega polja, $\hat{h}_x = H_x$ ter $\hat{h}_y = H_y$ pa sta kompleksni komponenti vzbujenega magnetnega polja. Susceptibilnost χ_i se zapiše s pomočjo Langevinove funkcije kot:

$$\chi_i = \frac{\phi M_d}{H_i} \left(\coth(\alpha_i) - \frac{1}{\alpha_i} \right), \quad (5)$$

¹ Zmes tekočine in v njej netopne trdne snovi.

² Sprijemanje delcev.

³ Spojina, ki znižuje površinsko napetost med dvema snovema.

⁴ Relaksacija predstavlja povratek sistema v ravnovesje in se jo karakterizira z relaksacijskim časom.

kjer je ϕ volumska koncentracija magnetnih delcev v tekočini, M_d je magnetizacija nasičenja nakopičenega materiala in α_i je Langevinov parameter, izražen kot:

$$\alpha_i = \frac{\mu_0 V_p M_d H_i}{k_B T}. \quad (6)$$

Tukaj je μ_0 permeabilnost praznega prostora. Časovno povprečena moč na enoto prostornine P se na koncu dobi kot:

$$P = \frac{\mu_0}{2} \operatorname{Re}(j\omega \hat{M}_x \hat{h}_x^* + j\omega \hat{M}_y \hat{h}_y^*). \quad (7)$$

To omogoča računanje izgub v rotacijskem magnetnem polju, ki je razdeljeno na x in y komponentni. Mi smo računali le za izmenično polje v x smeri. Za določanje grelnih zmožnosti magnetne tekočine se pogosto uporablja parameter SAR (specific absorption rate), ki pomeni specifična stopnja absorpcije. Je tudi najpogostejši parameter za eksperimentalno določitev izgub [5]. Izračunano vrednost izgub po enačbi (7), lahko preračunamo v parameter SAR kot [5]:

$$SAR = \frac{P}{\rho_m}, \quad (8)$$

kjer je ρ_m masna gostota magnetnih nanodelcev. Eksperimentalno se lahko SAR določi na več načinov. Najpogostejša je kalorimetrična metoda, kjer se po meritvi krivulje segrevanja SAR izračuna po enačbi (9) [5].

$$SAR = \frac{c\rho}{m_{Fe}} \left(\frac{dT}{dt} \right)_{max}, \quad (9)$$

kjer je c specifična toplota, ρ je gostota vzorca, m_{Fe} masa magnetnih nanodelcev na enoto volumna in $(dT/dt)_{max}$ je maksimalna vrednost časovnega odvoda merjene temperature.

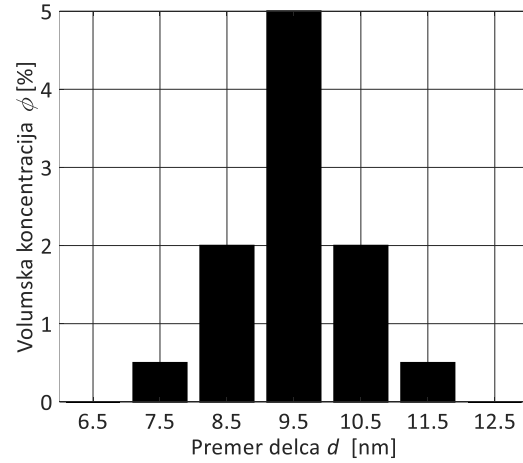
Poračunali smo odvisnosti izgubne moči od temperature, volumske koncentracije in jakosti magnetnega polja. Pri izračunih smo upoštevali parametre, ki jih prikazuje tabela 1.

Tabela 1. Parametri za izračun moči izgub. Parameter d_s predstavlja debelino surfaktanta na površini magnetnega delca.

Parameter	Vrednost
K_a	46,8 kJ/m ³
M_d	400 kA/m
d_s	0,5 nm
f	400 kHz

Pri izračunih odvisnosti od temperature in odvisnosti od volumske koncentracije smo uporabili amplitudo jakosti magnetnega polja $H = 3$ kA/m. Pri odvisnosti od volumske koncentracije in odvisnosti od jakosti magnetnega polja smo uporabili konstantno temperaturo $T = 20$ °C. Pri odvisnosti od volumske koncentracije smo

predpostavili velikost delcev $d = 9,5$ nm. Pri preostalih dveh odvisnostih smo uporabili porazdelitev delcev, kot jo prikazuje slika 1, pri čemer je bila skupna volumska koncentracija delcev postavljena na 10 %.



Slika 1. Porazdelitev delcev za izračune odvisnosti izgub magnetne tekočine od temperature in magnetnega polja.

Porazdelitev delcev smo upoštevali tako, da smo, kot so v literaturi [5], izračunali vsoto posameznih prispevkov posamezne skupine velikosti. To je prikazano z enačbo (10).

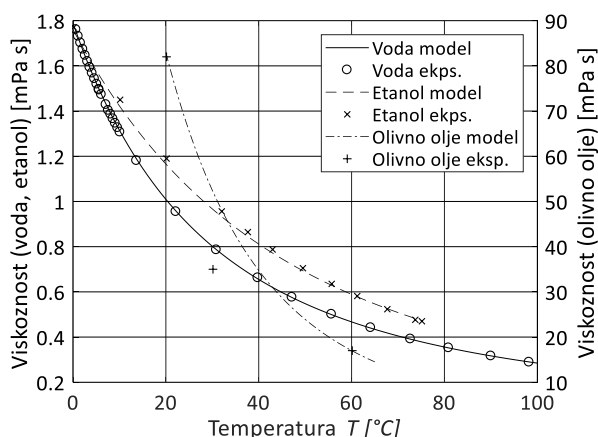
$$P = \frac{\mu_0}{2} \left(\sum_{k=1}^n \operatorname{Re}(j\omega \hat{M}_{xk} \hat{h}_x^* + j\omega \hat{M}_{yk} \hat{h}_y^*) \right). \quad (10)$$

Pri tem je n število skupin, ki je bilo v našem primeru $n = 5$.

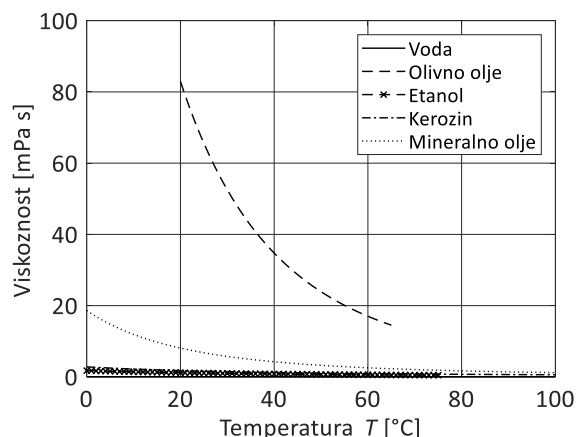
Analizirali smo pet možnih nosilnih tekočin: voda, olivno olje, etanol, kerozin RP1 [6] in mineralno olje 23D [7]. Za vodo, olivno olje in etanol smo uporabili model (11) iz literature [8], kjer so bili parametri A , B in C prilagojeni tako, da se čim boljše ujemajo z meritvami. To ujemanje prikazuje slika 2, kjer so podatki meritev vzeti iz literature [8].

$$\log \eta = A + \frac{B}{C-T}. \quad (11)$$

Tukaj je η viskoznost tekočine. Parametre za tri tekočine pa prikazuje tabela 2.



Slika 2. Primerjava modela (11) z izmerjenimi vrednostmi.



Slika 3. Primerjava temperaturnih odvisnosti obravnavanih tekočin.

Tabela 2. Parametri za enačbo (11) za vodo, olivno olje in etanol, pridobljeni iz [8].

Tekočina	A	B	C
Voda	-4,5318	-220,57	149,39
Olivno olje	-4,9110	-699,70	110,30
Etanol	-2,52	-799,10	-15,9

Za kerozin smo uporabili kombinacijo Vogelove relacije temperature in viskoznosti, ter Basusove relacije tlaka in viskoznosti [6]:

$$\eta(T, p) = \eta_0 e^{\frac{A}{T+D_V} + \frac{pB}{T+D_p}} \quad (12)$$

Kjer so konstante, pridobljene iz [6]:

$$\eta_0 = 6,33 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s},$$

$$A = 542,4 \text{ } ^\circ\text{C/GPa},$$

$$B = 544 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$D_V = 143 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$D_p = 25,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Za tlak smo pri tem upoštevali normalni zračni tlak: $p = 101325 \text{ Pa}$. Za mineralno olje pa smo upoštevali relacijo Vogel, Tammann in Fulcher [7]:

$$\eta = \eta_\infty e^{\frac{D_F T_\infty}{T - T_\infty}}, \quad (13)$$

kjer pa so konstante [7]:

$$\eta_\infty = 0,0300 \text{ mPa s},$$

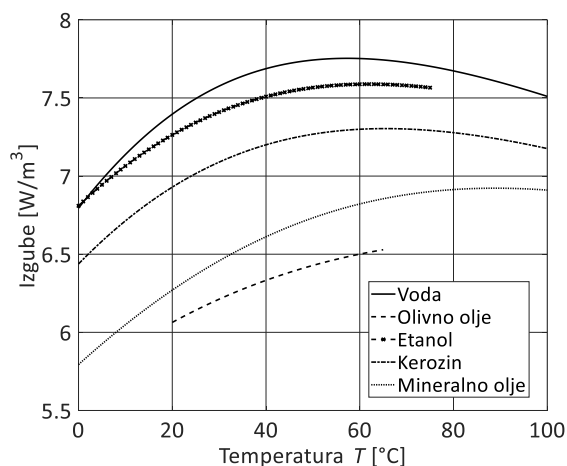
$$T_\infty = 139 \text{ K},$$

3 Rezultati

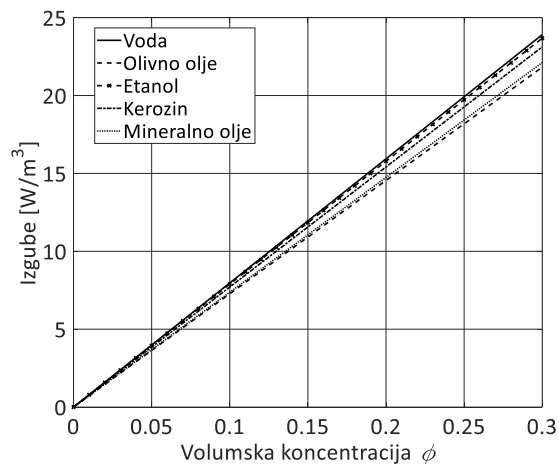
Temperaturne odvisnosti viskoznosti petih tekočin izračunane po modelih (11), (12) in (13) prikazuje slika 3.

Iz tega je vidno, da ima najvišjo viskoznost olivno olje, potem mineralno olje, nato pa še kerozin. Voda in etanol imata podobno viskoznost, pri čemer je viskoznost etanola nekoliko višja.

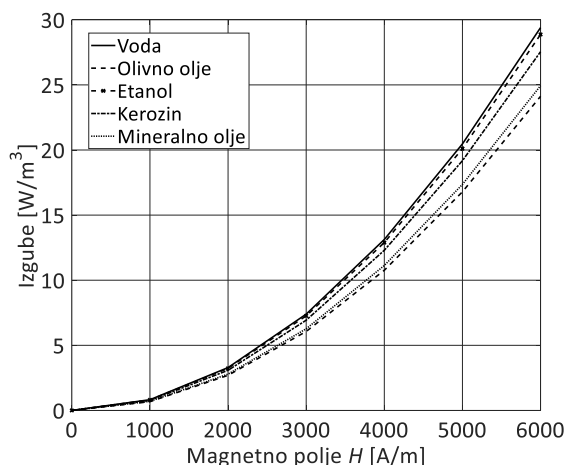
Rezultat izračuna izgub po enačbi (7) prikazujejo slika 4, slika 5 in slika 6.



Slika 4. Rezultati izračuna izgub v odvisnosti od temperature.

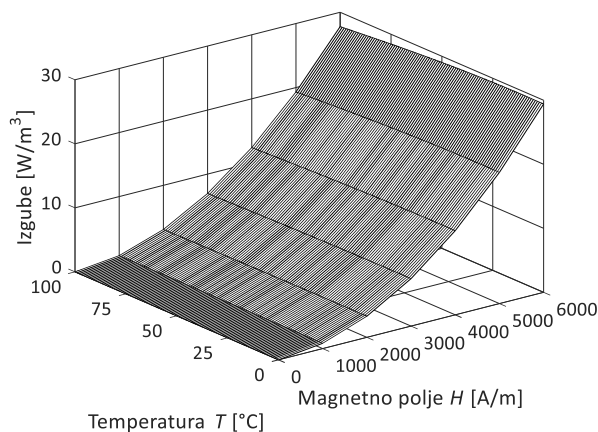


Slika 5. Rezultati izračuna izgub v odvisnosti od volumnske koncentracije magnetnih nanodelcev.



Slika 6. Rezultati izračuna izgub v odvisnosti od amplitude jakosti magnetnega polja.

Iz teh treh grafov je razvidno, da so izgube višje, kadar je viskoznost nosilne tekočine nižja, vendar pa je sprememba izgub višja pri spremembi volumnske koncentracije ali magnetnega polja, kot pri spremembi nosilne tekočine. Pri temperaturi $T = 20\text{ °C}$ je, glede na izračunane temperaturne odvisnosti viskoznosti, viskoznost olivnega olja približno 82-krat toliko, kot viskoznost vode. Pri izračunih odvisnosti izgub od volumnske koncentracije (slika 5) to pomeni, da so pri $\phi = 0,3$, zaradi različne viskoznosti, izgube pri vodi približno 10 % višje kot izgube pri olivnem olju. Pri spremembi ϕ iz 0,2 na 0,3 pa se izgube povečajo za približno 50 %. Podobno so pri izračunih odvisnosti izgub od magnetnega polja (slika 6), pri $H = 6\text{ kA/m}$, zaradi različne viskoznosti, izgube pri vodi za približno 22 % višje kot izgube pri olivnem olju, medtem ko se izgube pri spremembi jakosti magnetnega polja H iz 4 kA/m na 6 kA/m izgube povečajo za približno 124 %. Slika 7 prikazuje še 3-D prikaz odvisnosti izgub od temperature in magnetnega polja za vodo, pri porazdelitvi delcev, ki jih kaže slika 1.



Slika 7. 3-D prikaz odvisnosti izgub od temperature in magnetnega polja za primer vode.

4 Zaključek

Z matematičnim modelom za izračun izgub magnetne tekočine v magnetnem polju smo preverili, kakšen vpliv ima viskoznost nosilne tekočine na rezultat izračuna.

Ugotovili smo, da viskoznost ima vpliv na izračun in sicer so izgube večje v primeru, ko je viskoznost nosilne tekočine nižja. Tako so bile v naši obravnavi petih tekočin izgube največje v primeru vode in najnižje v primeru olivnega olja. So pa razlike v izgubah zaradi viskoznosti manjše v primerjavi z razlikami v izgubah zaradi spremembe drugih parametrov, kot sta volumnska koncentracija in pa amplituda jakosti magnetnega polja. Zato sklepamo, da je pri izbiri nosilne tekočine, sploh za namene magnetne hipertermije, najprej bolj smiselno upoštevati njene druge lastnosti, na primer biokompatibilnost, kot pa viskoznost. Če pa je cilj pridobiti čim večje izgube, da je gretje magnetne tekočine čim višje in učinkovito, pa je izbira nosilne tekočine zaradi njene viskoznosti vseeno pomembna.

Literatura

- [1] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*. Mineola, NY: Dover, 2014.
- [2] I. Sharifi, H. Shokrollahi, and S. Amiri, "Ferrite-based magnetic nanofluids used in hyperthermia applications," *J. Magn. Mater.*, vol. 324, no. 6, pp. 903–915, 2012.
- [3] S. Genc and B. Derin, "Synthesis and rheology of ferrofluids: a review," *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 3, pp. 118–124, 2014.
- [4] J. Vizjak, "Analiza vpliva magnetnega polja na viskoznost in grelni moč magnetne tekočine," University of Maribor, 2019.
- [5] M. Beković *et al.*, "Numerical Model for Determining the Magnetic Loss of Magnetic Fluids," *Materials (Basel)*, vol. 12, p. 591, 2019.
- [6] J. L. Tevaarwerk, *The Measurement, Modeling, and Prediction of Traction for Rocket Propellant 1*. NASA, 1989.
- [7] S. Bair, "Temperature and Pressure Dependence of Density and Thermal Conductivity of Liquids BT - Encyclopedia of Tribology," Q. J. Wang and Y.-W. Chung, Eds. Boston, MA: Springer US, 2013, pp. 3527–3533.
- [8] D. S. Viswanath, T. K. Ghosh, D. H. L. Prasad, N. V. K. Dutt, and K. Y. Rani, *Viscosity of Liquids: Theory, Estimation, Experiment, and Data*. Springer Netherlands, 2007.