

Új empirikus modell a nanofolyadékok viszkozitására

Novel empirical model for the viscosity of nanofluids

VADÁSZNÉ Dr. BOGNÁR Gabriella

egyetemi tanár
Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet
3515 Miskolc-Egyetemváros
+36 46 565111
v.bognar.gabriella@uni-miskolc.hu

Abstract

Although many viscosity models have been developed for several nanofluids over the past 50 years, there is not yet a generally accepted model for specifying the viscosity of nanofluids. Current models consider the effect of up to two to three parameters. We have proposed a new model for the efficient prediction of fluids, which uses a number of factors to detect the viscosity of nanofluids based on regression analysis of theoretical and experimental viscosity results, such as nanoparticle diameter, density, temperature, and nanoparticle material. The present model is based on 1,300 experimental and 4,000 theoretical data analyses and shows good agreement with the measurement results in the volume ratio and temperature ranges.

Keywords: nanofluid, nanoparticles, volume fraction, viscosity

Kivonat

Bár az elmúlt 50 évben nagyon sok viszkozitási modellt fejlesztettek ki többféle nanofolyadékra, nincs még általánosan elfogadott modell a nanofolyadékok viszkozitásának megadására. A jelenlegi modellek legfeljebb két-három paraméter hatását veszik figyelembe. Egy új modellt javasoltunk a folyadékok effektív előrejelzésére, amely viszkozitási modell elméleti és kísérleti viszkozitási eredmények regressziós analízise alapján számos olyan tényezőt vesz igénybe, ami miatt kimutatható a nanofolyadékok viszkozitása; ilyenek például a nanorészecskék átmérője, a sűrűsége, a hőmérséklete és a nanorészecske anyaga. A jelen modell 1300 kísérleti és 4000 elméleti adat elemzésén alapul és jó egyezést mutat a mérési eredményekkel a térfogatarány és a hőmérséklet tartományaiban.

Kulcsszavak: nanofolyadék, nanorészecske, térfogatarány, viszkozitás

BEVEZETÉS

A gyakorlatban a nanofolyadékok legfontosabb paraméterei a hővezető képesség és a viszkozitás. A viszkozitás hatással van a szivattyúzási teljesítményre is. Az elméleti viszkozitási modelleket széles körben alkalmazzák a numerikus vizsgálatokban. A mérési eredményekhez képest a meglévő modellek azonban a tényleges viszkozitástól jelentősen kisebb értékeket szolgáltatnak.

A műszaki gyakorlatban a víz, olaj és etilén/propilén-glikol gyakori hűtőfolyadékok, amelyeket számos mérnöki alkalmazásban alkalmaznak, ideértve az energiatermelést, az elektronikai alkalmazásokat, a légkondicionálást, a vegyipari gyártásokat, a fűtési és hűtési műveleteket, a nukleáris energiarendszerek hűtését és a mikroelektronikát. Ezek a folyadékok a szilárd anyagokhoz képest gyenge termikus tulajdonságokkal rendelkeznek. A nanofolyadékok nagy érdeklődést váltottak ki, mivel jó eredményeket mutatnak a hőátadás javításában. A hővezető képesség mellett a nanofluidok effektív viszkozitása egy másik fontos paraméter a hőátadási alkalmazásokban, amely befolyásolja a nyomásesést és a szivattyúzási teljesítményt. Az effektív viszkozitást az alapfolyadék viszkozitása, valamint számos paraméter határozza meg. A céloom javasolni egy a kutatók által már bevezetett elméleti, numerikus és kísérleti viszkozitási modellekhez képest egy új modellt, mely a nanofolyadékok széles körében alkalmazható.

A VISZKOZITÁS MODELLEK FEJLŐDÉSE

A kísérleti eredmények igazolják, hogy a nanorészecskék hozzáadása a hagyományos hűtőfolyadékhoz növeli a folyadékok hővezetési képességét és viszkozitási tulajdonságai is jobbak, mint a hagyományos hűtőközegé. Bár egyre több kutatás folyik a nanofolyadékok viszkozitásával kapcsolatban, nagyon kevés tanulmány foglalkozott elméleti modellek kidolgozásával a nanofolyadékok viszkozitásának leírására, és nem áll rendelkezésre olyan széles körben alkalmazható modell, amely pontosan megjósolná a viszkozitást. Ezért a kutatók gyakran alkalmaznak klasszikus viszkozitási modelleket, vagy különböző mérési adatokon alapuló empirikus modelleket.

Az alapfolyadékban lévő részecske szuszpenzió becslésére használt elméleti képletek közül az Einstein-egyenlet volt az első, amely egy híg, szuszpendált, kis (0-2%) térfogatarányú és gömb alakú nanorészecskéket tartalmazó nanofolyadék reológiai viselkedését vizsgálta. A modell korlátja, hogy Einstein nem vette figyelembe a részecskék kölcsönhatását a szuszpenziókban. Ennek a jelenségnek jelentős hatása lehet nagyobb térfogataránynál, és a részecskék kölcsönhatása befolyásolhatja a nanofolyadék viszkozitását. Az Einstein-képlet a következő [1]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2,5 \varphi, \quad (1)$$

ahol μ_{nf} a nanofolyadék, μ_{bf} az alapfolyadék viszkozitását, φ a nanorészecskék térfogatarányát jelöli. Számos tanulmány javasolta a szuszpenzióban lévő magasabb koncentrációk okozta hidrodinamikai kölcsönhatások figyelembevételét. 1952-ben Brinkman általánosította az Einstein-féle összefüggést magasabb koncentrációkra. Ez a képlet kicsit magasabb (0-4%) részecske térfogatarányra is érvényes [2]

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1-\varphi)^{2,5}}. \quad (2)$$

1959-ben Krieger és Dougherty [3] egy félig empirikus viszkozitás összefüggést javasoltak:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_m} \right) \right)^{-[\mu]\varphi_m}, \quad (3)$$

ahol φ_m az ún. maximális részecske csomagolási arány ($\varphi_m = 0,495 \dots 0,54$). 1972-ben Lundgren vezette be az alábbi Taylor-soron alapuló képletet a φ függvényében [4], ahol az Einstein modellhez további tagok járulnak:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2,5\varphi + \frac{25}{5}\varphi^2 + f(\varphi^3) \quad (4)$$

és f egy függvényt jelöl. 2005-ben Maiga és társai [5] a 0-8%-os térfogat arányú Al₂O₃-etilén glikol szuszpenziójára, és a következő összefüggést dolgozta ki:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 - 0,19\varphi + 306 \varphi^2. \quad (5)$$

A későbbi években számos viszkozitási modell jelent meg a szakirodalomban figyelembevéve a nanorészecskék alakját, méretét és anyagát. 2009-ben Masoumi és társai [6] új elméleti modellt dolgoztak ki a nanofolyadékok viszkozitásának előrejelzésére, figyelembe véve a Brown-mozgást. Ezzel a modellel kiszámítható az effektív viszkozitás a T hőmérséklet, a d_p átlagos részecskeátmérő, a φ nanorészecske térfogathányad, a ρ_p nanorészecske sűrűség és az alapfolyadék fizikai tulajdonságai alapján. Ilyen módszerrel akár a két különböző folyadékból álló folyadék viszkozitása is felírható:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72\delta C}, \quad V_B = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18k_b T}{\pi \rho_p d_p}}, \quad \delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\varphi}} d_p, \quad (6)$$

ahol a V_B Brown-sebesség, a δ nanorészecskék közötti távolság és C a korrekciós tényező. A szerzők azonban a (6)-os egyenletet csak nagyon korlátozott számú kísérleti adatból, mindössze 8 adatból határozták meg és a képlet csak korlátozott térfogatarányra érvényes.

AZ ÚJ VISZKOZITÁS MODELL

A jelen módszer eredményeit több mint 1150 kísérleti adattal hasonlítottuk össze, és nagyon jó egyezést találtunk a mérési eredményekkel. Az új összefüggés leírásához a μ_{eff} viszkozitás két részből:

$$\mu_{eff} = \mu_{static} + \mu_{Brownian}, \quad (7)$$

$$\mu_{static} = \mu_{bf} (1 + A_1 \varphi_e + A_2 \varphi_e^2 + A_3 \varphi_e^3) \quad (8)$$

ahol a φ_e kiszámítására használt képlet

$$\varphi_e = \varphi \left(1 + \frac{h}{r}\right)^3, \quad (9)$$

amelyben h a nanoréteg vastagsága és r a nanorészecske sugara.

Az A_1 , A_2 és A_3 értékeket 21 φ -től függő viszkozitási modellből regressziós elemzéssel határoztuk meg összesen 4000 a szakirodalomból vett mérési adatot figyelembe véve a 0...0,2 térfogathányad tartományban.

A kiszámított statikus viszkozitást több viszkozitási modellel hasonlítottuk össze. Megfigyeltük, hogy az effektív viszkozitás előrejelzésében a térfogathányadtól függően nagy a különbség. Az általunk javasolt viszkozitási modellben a nanorészecskék Brown-mozgása miatt a statikus viszkozitáshoz hozzáadjuk a $\mu_{Brownian}$ kifejezést [6]:

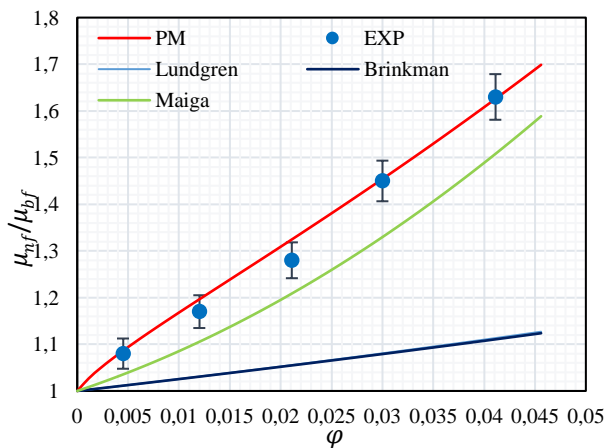
$$\mu_{Brownian} = \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72 C \delta}. \quad (10)$$

Az átvizsgált tanulmányok a viszkozitás kísérleti eredményeiről a nanorészecskék térfogati hányadától, az átmérőtől, a hőmérsékleti tartománytól és a mérési adatok számától függenek. A kísérleti adatok elemzése alapján a (10)-ben szereplő C korrelációs tényezőt φ és T függvényének tételezzük fel. A kísérleti eredmények értékelésével a C korrekciós tényező kiszámítását a következő képletet javasoljuk.

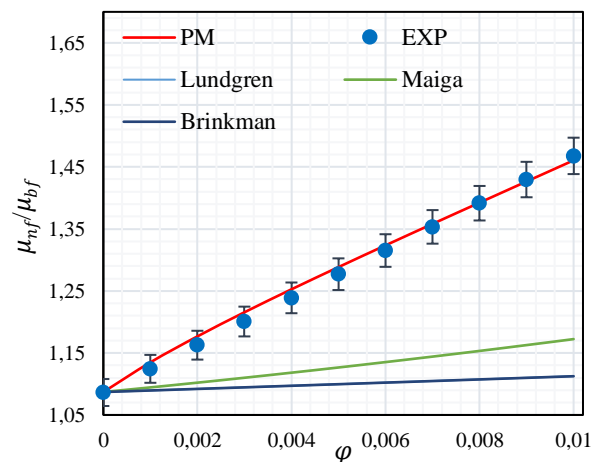
$$C(T, \varphi) = D_1 T^{-B_1} + D_2 \varphi^{-B_2}, \quad (11)$$

ahol B_1 , B_2 és D_1 , D_2 a kísérleti adatok alapján számított állandók.

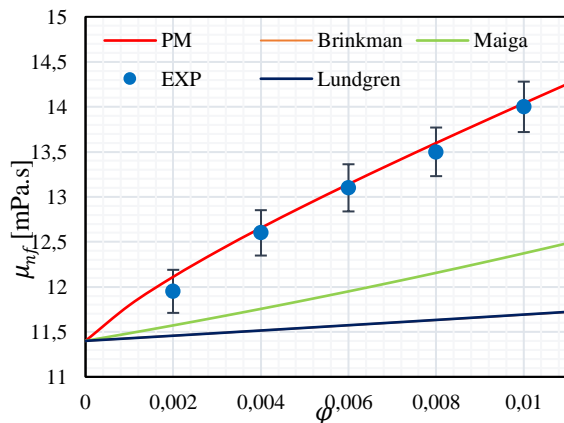
Az alábbiakban néhány nanofolyadék esetén szemléltetjük az új modell (PM) és a korábbi modellek (Brinkman, Lundgren és Maiga) összevetését a mérési eredményekkel.



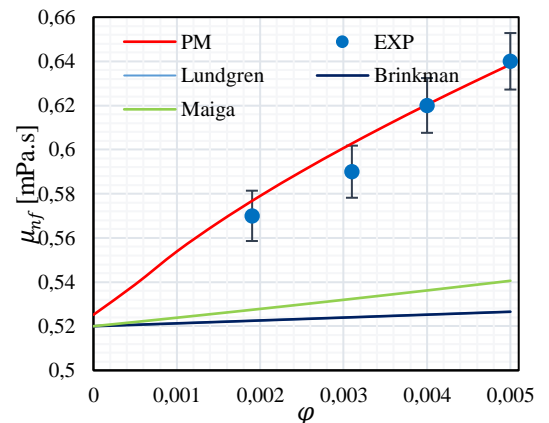
1.ábra. CaCO₃-víz (20–50 nm, 293K) [7]



2.ábra MWCNT-víz (5–10 nm, 293K) [8]



3. ábra SiC-EG-víz (60;40) (30 nm, 283K) [9]

4. ábra Fe₃O₄-toluene (10nm, 293K) [10]

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben egy új viszkozitási formulát mutattunk be, amely homogéneen diszpergált merev és gömb alakú nanorészecskéket tartalmazó folyadék effektív viszkozitásának meghatározására alkalmas.

A nanofluidok effektív viszkozitása két részből áll, a statikus és dinamikus vagy Brown-viszkozitásból. A nanofolyadék viszkozitásának statikus része az elméleti és kísérleti modelltől végzett regressziós analízis és a nanoréteg miatti viszkozitáshatás kombinációja. Egy korrekciós tényezőt származtattunk a hőmérséklet és a térfogathányad függvényében. A korrekciós tényező paramétereit számos kísérleti eredmény felhasználásával határoztuk meg, a korrekciós képletet pedig mintegy 50 különböző nanofolyadékkal teszteltük. Az új modell teszteléséhez hozzávetőleg 1200 kísérleti viszkozitási értéket használtunk, amelyek 87%-a a 0,9-0,99%-os korrelációs együtthatón belül van.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A publikáció az NKFIH által támogatott K_18 129257 projekt keretében készült.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] A. Einstein, Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen, *Ann. Phys.*, **324**, no. 2, pp. 289–306, 1906.
- [2] H. C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *J. Chem. Phys.*, **20**, no. 4, p. 571, 1952.
- [3] I. M. Krieger and T. J. Dougherty, A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres, *Trans. Soc. Rheol.*, **3**, no. 1, pp. 137–152, 1959.
- [4] B. T. S. Lundgren, Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres, *J. Fluid Mech.*, **51**, no. 2, pp. 273–299, 1972.
- [5] S. El Bécaye Maïga, S. J. Palm, C. T. Nguyen, G. Roy, and N. Galanis, “Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 26, no. 4 SPEC. ISS., pp. 530–546, 2005.
- [6] N. Masoumi, N. Sohrabi, and A. Behzadmehr, A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **42**, p. 055501, 2009.
- [7] H. Zhu, C. Li, D. Wu, C. Zhang, and Y. Yin, “Preparation, characterization, viscosity and thermal conductivity of CaCO₃ aqueous nanofluids,” *Sci. China Technol. Sci.*, **53**, no. 2, pp. 360–368, 2010.
- [8] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, O. Mahian, and S. Wongwises, “Thermophysical properties, heat transfer and pressure drop of COOH-functionalized multi walled carbon nanotubes/water nanofluids,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, **58**, pp. 176–183, 2014.
- [9] X. Li and C. Zou, “Thermo-physical properties of water and ethylene glycol mixture based SiC nanofluids: An experimental investigation,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, **101**, pp. 412–417, 2016
- [10] R. Singh, O. Sanchez, S. Ghosh, N. Kadimcherla, S. Sen, and G. Balasubramanian, “Viscosity of magnetite-toluene nanofluids: Dependence on temperature and nanoparticle concentration,” *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, **379**, no. 40–41, pp. 2641–2644, 2015.