

## CNT ADALÉKOLT KENŐANYAG VISZKOZITÁSÁNAK VIZSGÁLATA

**Kocsis Gergely**

BSc hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [kocsisgergo98@gmail.com](mailto:kocsisgergo98@gmail.com)

**Papp Szonja**

MSc hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [szony97@gmail.com](mailto:szony97@gmail.com)

**Vadászné Dr. Bognár Gabriella**

egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [y.bognar.gabriella@uni-miskolc.hu](mailto:y.bognar.gabriella@uni-miskolc.hu)

**Dr. Kovácsné Federer Gabriella**

adjunktus, Miskolci Egyetem, Kőolaj és Földgáz Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [g.federer@uni-miskolc.hu](mailto:g.federer@uni-miskolc.hu)

### **Absztrakt**

Célunk olyan két komponensből álló kenőanyag vizsgálata, melyben a nanoméretű CNT szemcsék egyenletesen szétoszlatva (diszpergálva) vannak jelen a glicerin alapfolyadékban. A cikkben glicerin és szén nanocsövek különböző arányú keverékének viszkozitását elemezzük a hőmérséklettől és a fordulatszámától függően. Megállapítottuk, hogy a glicerin nyírófeszültsége egyenesen arányos a deformációsebességgel. Ha a kenőanyag 1 m% CNT-t tartalmaz, akkor pszeudoplasztikus jelleget mutat; a nyírófeszültség-nyírási sebesség hatványtörvényszerinti összefüggésében a kitevő a hőmérséklet növelésével csökken.

**Kulcsszavak:** glicerin, CNT, többfalú nanocsövek, viszkozitás, nemnewtoni folyadék

### **Abstract**

Our aim is to investigate a two-component lubricant in which the nanoscale CNT particles are uniformly dispersed in the glycerol base fluid. In this article, the viscosity of a mixture of glycerol and carbon nanotubes of different mass concentration is analyzed depending on the temperature and the rotational speed. We have found that the shear stress of glycerol is directly proportional to the deformation rate. If the lubricant contains 1% of CNT, it exhibits a pseudoplastic character; in the shear stress-shear rate connection, the exponent decreases with increasing the temperature.

**Keywords:** glycerol, CNT, multi-walled nanotubes, viscosity, no-Newtonian fluid

### **1. Bevezetés**

A viszkozitás a kenőolajok legfontosabb jellemzője. A viszkozitás az olaj nyíró feszültséggel szembeni ellenállóképessége. A nagy viszkozitás nagy belső súrlódást is jelent. A kenőanyagok viszkozitása exponenciálisan csökken a hőmérséklet növekedésével, melynek hatására a kenőképességük is csökken. Emiatt fontos szempont a megfelelő kenőanyag vizsgálatánál és kiválasztásánál az anyag viszkozitása és annak változása.

1873-ban Maxwell tanulmányában jelent meg először a szilárd részecskék folyadékba való diszpergálása [1].

Nanofolyadékoknak nevezzük azokat a folyadékokat, amelyekben nanométer méretű részecskék találhatók [2]. A nanofolyadékok esetén fontos ismerni a termofizikai tulajdonságokat: hővezető képesség, viszkozitás, hőkapacitás, és sűrűség. A nanofolyadékok legfontosabb tulajdonsága a viszkozitás. A viszkozitás növekedésével nagyobb energiamennyiség szükséges a folyadék keveréséhez és szivattyúzásához. A szivattyú teljesítmény és a nyomásesés két fontos viszkozitástól függő tényező. A nanofolyadékok viszkozítására ható tényezők az elkészítés módja, az alapfolyadék típusa, a hőmérséklet, a részecskék mérete és alakja, a koncentráció, a nyírófeszültség, az adalékanyagok, stb. [3]

A hagyományos folyadékokat, mint a víz, olaj, etilén/propilén glikol, széles körben alkalmazzák a műszaki gyakorlatban. Ilyenek például a hőerőművek, elektronikus alkalmazások, légkondicionálók, vegyipar, hűtő-fűtőberendezések, nukleáris rendszerek hűtése, mikroelektronika. Ezeknek az anyagoknak a hővezető képessége szerényebb a szilárd halmazállapotú anyagokéhoz viszonyítva, azonban ez a képesség növelhető, ha az alapfolyadékhoz szilárd részecskéket adunk. Ezek különböző méretűek lehetnek. Nanofolyadékokról akkor beszélünk, ha az alapfolyadékhoz adott részecskék mérete kisebb, mint 100 nm. Kísérletekkel bizonyították, hogy az ilyen elegyeknek jobb a hővezető képessége, mint ha milli- vagy mikrométer méretű részecskéket adnak a folyadékhoz [2].

Különböző kutatások folynak a nanorészecskék előállítására, mint a kerámiaoxid, metáلكarbid, nitridek, fémek (Al, Cu, Au), nemfémek, valamint karbon nanocsövecskék. A szén nanocsövek (carbon nanotube – CNT) a fullerének családjának tagjai, melyeket Sumio Iijima 1991-ben figyelt meg elektronmikroszkópos felvételeken [15], ám már az 50-es évek elején említést tettek szálszerű üreges szénrészecskékről katalizátorok felületén [16]. A szén nanocsövek (carbon nanotubes – CNT) lehetnek egyfalúak (single walled nanotubes – SWCNT) vagy többfalúak (multi walled carbon nanotubes – MWCNT). Ezek az anyagok alapfolyadékokban (víz, olajok, más kenőanyagok) diszpergálva nanofolyadékot adnak [4].

Számos átfogó tanulmány jelent meg a nanofolyadékok termofizikai tulajdonságainak vizsgálatáról, melyekben a viszkozitást, hővezető képességet és hőkapacitást vizsgálják különböző alapfolyadékba (víz, etilén glikol, hajtóműolaj, glicerin, paraffin) elegyített nanorészecskékénél [1].

Murshed és szerzőtársai [5] henger, valamint gömb alakú  $\text{TiO}_2$  nanorészecskét diszpergáltak ionmentes vízben. A kísérletben javulást mutatott ki a hővezető képességben a részecske térfogatszázalékának növelésével (0,5-5 V/V%), és hatással volt rá a részecske mérete és alakja is. A 15 nm átmérőjű gömb alakú  $\text{TiO}_2$  nanorészecske 29,7 %-os javulást mutatott 5 m%-on, míg a  $\varnothing 10$  nm x 40 nm-es henger alakú  $\text{TiO}_2$  nanorészecske 32,8 %-os javulást produkált ugyanazon a tömegszázalékon.

Liu és társai [6] kísérlet alapján rámutattak a hővezető képesség javulására MWNT-etilén glikol nanofolyadékban a nanorészecske koncentráció növelése esetén. 1 V/V%-os térfogatkonzentrációnál 12,4%-os javulást mutatott az oldat hővezetőképessége.

Kole és Dey [7]  $\text{CuO}$ -hajtóműolaj elegy esetén tanulmányozták a hővezetés változását, melynek eredményeképp megállapították, hogy 5-80°C között történő mérés esetén, szobahőmérsékleten, 0,025-ös térfogatarány esetén 10,4%-os, míg ugyanilyen térfogatarány mellett 80°C-on 11,9%-os javulást mutatott a hővezető képesség.

Zhang [8] a többfalú karbon nanocsövek hővezetési képességét vizsgálta különböző vastagságú filmekben.

A különböző tényezők hatásának vizsgálata szintén sok kutató figyelmét felkeltette. Theng [9] 5-100 nm átmérőjű  $\text{Al}_2\text{O}_3$  részecskék vízben való elegyítésénél vizsgálta a részecskék méretkülönbségének hatását.

Xie [10] a részecskék alakjának hatásait vizsgálta gömb és hengeres SiC részecskékénél.

Egyfalú és kétfalú karbon nanocsövek alkalmazása nagymértékben növeli a hővezető képességet, ezt Hung és Chou [11] vizsgálták. Víz alapfolyadékba kevert többfalú nanocsöveket tartalmazó folyadék viszkozitását vizsgálták 1,5; 0,4 és 2,33 m% nanocső mellett. Az így kapott eredményeket összehasonlították az ionmentesített víz viszkozitásának értékével.

Suganthi és Rajan [12] víz alapfolyadékba keverték 0,25-2 V/V%-ban ZnO nanorészecskéket. Kimutatták, hogy 35-55°C hőmérséklet-tartományban történő hőmérsékletnöveléssel csökken a folyadék viszkozitása.

Sundar [13] F<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetit és desztillált víz összetételű nanofolyadék viszkozitását vizsgálta. A vizsgálati hőmérsékletet 20-60°C között változtatta. Megállapította, hogy a viszkozitás a nanorészecske koncentrációjával növekedett. 0,2 V/V%-os tartományban 2,96-szorosára nőtt a viszkozitás.

Halefadi [14] a térfogatszázalék és hőmérséklet változását vizsgálta MWCNT – ionmentes víz nanofolyadékban. A koncentrációt 0,0055 térfogat%-ról 0,55 térfogat%-ra növelték, és megállapították, hogy a nanofolyadék alacsony nanorészecske koncentráció esetén newtoni, magasabb koncentrációnál pedig kvázi plasztikusként viselkedett.

Said [15] Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – víz és TiO<sub>2</sub> – víz elegyeket vizsgált különböző hőmérsékleteken. A mérések eredményeiből kimutatható lett, hogy a hőmérséklet növelésével mindkét esetben csökken a viszkozitás.

Kole és Dey [16] a CuO – hajtóműolaj nanofolyadékot elemezték. A CuO nanorészecske térfogatszázalékát 0,005-ről 0,025-re emelték, a hőmérsékletet pedig 10°C-ról 80°C-ra. Kimutatták, hogy a viszkozitás közel háromszorosára nőtt 0,025 V/V%-nál 10°C-on, majd a hőmérséklet növelésével jelentősen lecsökkent.

Rashin és Hemalatha [17] ZnO és kókuszolaj nanofluid viszkozitását vizsgálták különböző hőmérsékleten és különböző koncentrációban. A folyadék 0-2,5%-os tartományban nemnewtoni viselkedést mutatott. Khedkar [18] Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> – paraffin keverékben 0,01-0,1 V/V% arányú nanorészecskékénél vizsgálta a viszkozitást. A nanorészecskéket paraffinban ultrahangos készülékkel diszpergálta, és a kísérletek kimutatták, hogy a viszkozitás nőtt a térfogat arány növelésével, de kevésbé, mint azt az Einstein modell szerint várták. Az Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> – paraffin nanofolyadék nemnewtoni viselkedést mutatott alacsonyabb nyírófeszültségen, míg magas nyírófeszültségen newtonit.

Moghaddam [19] a glicerin – grafén keveréket vizsgálta 0,0025-0,02 m% között 20-60°C-os hőtartományban. Az eredmények alapján megállapította, hogy a viszkozitás függ a tömegaránytól és a hőmérséklettől. 2 V/V%-os grafén arány esetén, szobahőmérsékleten vizsgálva a folyadékot a viszkozitás 401,49%-kal nőtt.

Célunk olyan két komponensből álló kenőanyag vizsgálata, melyben a nanoméretű CNT szemcsék egyenletesen szétoszlatva (diszpergálva) vannak jelen a glicerin alapfolyadékban. Az ilyen rendszereket diszperz rendszereknek nevezik. Ha a részecskék mérete 1-1000 nm között van, akkor kolloidokról beszélünk. A dolgozatban glicerin és szén nanocsövek különböző arányú keverékének viszkozitását elemezzük a hőmérséklettől függően.

## 2. Viszkozitási modellek

A nanofolyadékok viszkozitásának becslésére többféle módszer létezik. Newtoni folyadékról akkor beszélünk, ha a deformáció sebesség és a nyírófeszültség között egyenes arányosság van [20]:

$$\tau = \mu \frac{dy}{dt}, \quad (1)$$

ahol  $\frac{d\gamma}{dt}$  a deformáció sebesség. A víz és a glicerin olyan általánosan használt folyadékok, melyek eleget tesznek Newton posztulátumának. A glicerin viszkozitása SI alapegységben 1 Pa s, míg a víz viszkozitása  $1 \cdot 10^{-3}$  Pa s, vagyis 1000-szer kevésbé viszkózus. Bármely olyan folyadék, melynek viselkedése a Newton-féle egyenlettel nem jellemezhető, nemnewtoni folyadéknak tekintendő. Az ilyen folyadékok folyási tulajdonságai eltérést mutatnak a lineáris Newton-féle modelltől. A viszkozitásuk csak úgynevezett látszólagos viszkozitás, melynek jele  $\mu^*$  és

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} = \mu^* \dot{\gamma}, \quad (2)$$

ahol  $\tau$  - nyírófeszültség,  $\dot{\gamma}$  - deformáció sebessége,  $\mu^* = f(\dot{\gamma})$  - látszólagos viszkozitás. A nemnewtoni folyadékok reológiai tulajdonságait leíró viszkozitási görbék különböző karakterisztikát mutathatnak.

Nemnewtoni folyadékokra felírható viszkozitási modellek látszólagos viszkozitása egyszerű nyírás esetén különböző formulával írható fel [20]. Az alábbiakban a teljesség igénye nélkül néhány nemnewtoni folyadék viszkozitási tényezőjét ismertetjük, amikor a  $\mu^*$  a nyírás pillanatnyi állapotától függ:

- Ostwald-de Waele modell:

$$\mu^* = K|\dot{\gamma}|^{n-1} = c\tau^{\frac{n-1}{n}}, \quad (3)$$

- Reiner – Philippoff modell:

$$\mu^* = \mu_{\infty} + \left[ \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{k\tau^2} \right], \quad (4)$$

- Ellis modell:

$$\mu^* = \frac{\mu_0}{1 + b \left| \frac{\tau}{\tau_0} \right|^{m-1}}, \quad (5)$$

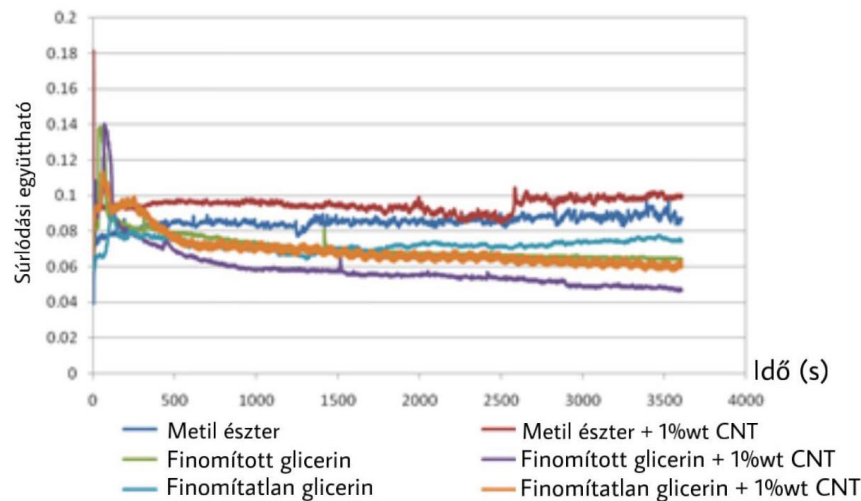
- Carreau modell:

$$\mu^* = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{[1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{\frac{1-n}{a}}}. \quad (6)$$

### 3. CNT tartalmú kenőanyagok

Jelenleg fontos kutatási irány a nanoszerkezetű anyagok felhasználása kenőanyag fejlesztésben. A szén allotróp módosulatai, mint például grafén nanolapok, többfalú szén nanocsövek, szén nanogolyók és fullerén szintén felhasználhatók a kenőanyag tulajdonságainak módosítására.

A nanorészecskék kenőanyagokban adalékként való alkalmazása rengeteg változatos megoldást kínál, melyek közül a karbon nanocsövek (CNT) igen kedvező adalékanyagok lehetnek, figyelembe véve hengeres, „gördülékeny” formáját és kiemelkedő mechanikai tulajdonságait. A CNT, mint adalékanyag tribológiai tulajdonságait már több kutatás során vizsgálták [34,35], azonban kevés tudományos anyag született olyan nanofolyadékról, mely során természetes olajbázisú kenőanyaggal elegyítjük a CNT-t. A kenőanyag kenési képességének leírására szolgáló egyik tulajdonság a súrlódási együttható karakterisztikája [36].

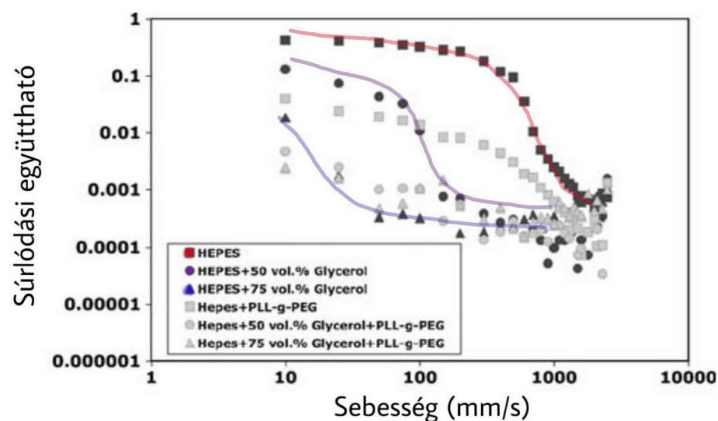


1. ábra. Súrlódási együttható változása az idő függvényében [36]

Az 1. ábrán látható négygolyós mérés eredményeképp meghatározott súrlódási együtthatót 400 N-os terhelésnél 1200-as fordulatszám, 75°C-os kenőanyag hőmérséklet mellett számították. A mérést elvégezték CNT hozzáadása nélkül, majd 1 m% karbon nanocső hozzáadásával. Az így kapott szuszpenzióval végzett tribológiai vizsgálatok kiértékelése után megállapítható, hogy a CNT előnyösen viselkedik glicerinnel való elegyedés esetén, ugyanis a súrlódási együttható a csökkenés mellett egyenletesebben is rajzolódott ki. Azonban a metil-észterrel alkotott nanofolyadék nem mutatott javulást súrlódás tekintetében, sőt, kifejezetten kerülni való, ha a súrlódás csökkentésére törekszünk.

Az eredmények kiértékelése alapján a karbon nanocső és glicerín által létrehozott nanofolyadék optimális kenőanyagként bizonyul állandó hőfokon, állandó fordulatszám mellett.

A 2. ábra bemutatja különböző kenőanyagok különböző sebességen mért súrlódási együtthatóit.



2. ábra. Súrlódási együttható változása a sebesség függvényében [37]

Minden kenőanyag mérése pin on disc méréssel készült, mely során acélgolyót mozgattak üveg felületen, melyre kenést vittek fel. Az alapul vett kenőanyag a HEPES vegyület, melyhez változó arányban különféle adalékokat kevertek. A HEPES (teljes nevén 4 - (2-hidroxietil) – piperazin – 1 –

etánszulfonsav, egy amfoter ionos szerves kémiai pufferolószer) egy állandó pH-t biztosító oldat. Az egyik alapvegyülethez kevert adalékanyag, mellyel mi is foglalkozunk, a glicerín. Az első mérést a tiszta alapkenőanyaggal végezték, majd ehhez 50 v/v% térfogatszázalékban glicerint kevertek, melynek hatására bizonyos sebesség elérése után a súrlódási együttható jelentősen csökkent. Ezt követően felemelték a glicerín térfogatszázalékát 75%-ra, aminek hatására szinte azonnal lecsökkent a súrlódás értéke [37].

A mérésből kapott diagramról leolvasható, hogy a glicerín minél nagyobb százalékban megtalálható az alap kenőanyagunkban annál előnyösebben befolyásolja a súrlódási együtthatót a sebesség függvényében. Ez alapján kijelenthető, hogy a glicerín változó sebességek mellett is megfelelő kenést biztosíthat.

## 4. A felhasznált anyagok

### 4.1 Glicerín

A glicerín, vagy glicerol régi magyar neve olajjéd, vagy zsírédeny. A többértékű cukoralkoholok közé tartozik, képlete  $\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$ . Színtelen, szagtalan, viszkózus anyag.

A glicerint kémiai úton propilénből állítják elő, de növényi olajokból is nyerhető, amelyre főként a kókuszolajat alkalmazzák. A biodízel előállítás egyik lényeges mellékterméke a glicerín, ugyanis 1 liter biodízel előállításakor kb. 100 g keletkezik.

### 4.2 Többfalú nanocső

A kenőanyag előállításához többfalú nanocsövet alkalmaztunk. A nanocsövek tulajdonságait szerkeztük, méretük és felépítésük határozzák meg. Morfológiájuk és méretük miatt nagy a fajlagos felületük és ez értékessé teszik az anyagot kémiai és mechanikai felhasználásra. A szén nanocsövek kis sűrűségű anyagok, jellemző fizikai-kémiai tulajdonságaik erősen függenek az előállítás módjától és a tisztítástól. A szén nanocsöveket sok előnyös tulajdonsággal fel lehet ruházni azok felületi és szerkezeti tulajdonságainak megváltoztatásán keresztül.

A nanorészecskék alakjukat tekintve lehetnek gömb alakúak vagy hengerek. Az általunk használt karbon nanorészecskék hengerek, melyeket karbon nanocsöveknek (CNT) neveznek. A nanocsövek egyik fajtája a többfalú nanocső (MWCNT), ilyenkor egy alakzatban koncentrikusan több cső helyezkedik el.

Az alkalmazott nanocsöveket, melyet a Miskolci Egyetem Kémiai Intézetben állítottak elő. Ezek többfalú, bambusz alakú szén nanocsövek. A legszélesebb körben CCVD (katalitikus kémiai gőz lera-kó) eljárással állítják elő az ilyen típusú anyagokat. A CCVD szintézis során nikkel-nitrát-hexahidrát sóból állítottak elő nitrogén tartalmú bambusz alakú CNT-t megfelelő körülmények között nitrogén tartalmú szénforrást alkalmazva [39].

A saját kenőanyag előállításához glicerint használtunk alapfolyadéknak, melyben mechanikusan kevertük el a nanocsöveket, közel homogén elegyet alkotva. Azonban a csövek karcsúsága és a karbonfelületek között megtalálható erős Van der Waal's kötés miatt a nanocsövek teljes oldása körülményes. A mérésekhez készített mintákat megválasztott tömegszázalék alapján állítottuk elő a nanocsövek bonyolult térbeli kiterjedése miatt.

A megfelelő tömegszázalékú keverékek előállításához nagy pontosságú tömeg mérést alkalmaztunk. A szén nanocsövek és a glicerín méréséhez 0,1 mg pontosságú Ohaus Pioneer precíziós analitikai mérleget használtunk, ezen mértük ki a glicerín és az MWCNT tömegeket. Ezután az elegyeken

Hamilton Beach Scovill 3 speed mixer 936 keverővel keverést végeztünk  $10.000 \text{ min}^{-1}$  fordulatszámon. Így különböző típusú kenőanyagokat állítottunk elő, amelyekben az MWCNT tömegszázaléka: 0, 0,10, 0,20, 0,50 és 1,00 m%.

## 5. A mérés menete

Összesen öt féle anyagot vizsgáltunk, amelyben glicerín és nanocsövecskék különböző arányú keverékének viszkozitását mértük különböző hőmérsékleten és különböző deformáció sebességen. Viszkozitás meghatározásához használható rotációs viszkoziméter, melyen a Földtudományi Kar Kőolaj és Földgáz Intézetében kísérleti méréseket végeztünk. A minták mérése két, koncentrikus henger közti körgyűrű alakú résben történt. A külső henger, a minta tartály, a belső bob egy előre beállított fordulatszámon forog. Meghatározható a belső henger, a bob felületén fellépő súrlódási erő, és így a folyadékban fellépő súrlódási erő, valamint ebből a viszkozitás.

Az alkalmazott rotációs viszkoziméter, a Fann 50SL típusú Rheometer, amely  $500^\circ\text{F}$  ( $260^\circ\text{C}$ ) hőmérséklet értékig and  $1,000 \text{ PSIG}$  ( $7,000\text{kPa}$ ) nyomás értékig koaxiális henger tartályban képes a viszkozitás megállapítására. A hevítés, a nyomás és a forgórész sebessége egy megfelelő szoftverrel kontrollálható. A tartályban mérésenként  $42 \text{ ml}$  folyadék mennyiséget helyeztünk el.

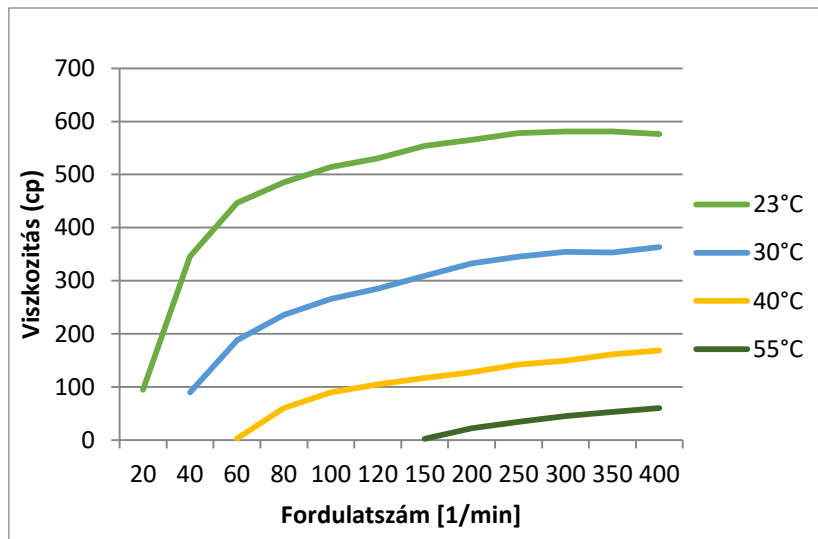
A viszkoziméter beállításai az alábbiak voltak:

- Rotor átmérő: R1,  $1,8415 \text{ cm}$
- Bob: B5,  $1,5987 \text{ cm}$  átmérő,  $7,620 \text{ cm}$  hossza
- Sugárárány:  $0,868151$

A mért adatok:

- eltelt idő [s]
- hőmérséklet [C]
- nyomás [psi]
- fordulatszám [ $\text{min}^{-1}$ ]
- deformációsebesség [ $\text{s}^{-1}$ ]
- nyírófeszültség [ $\text{lb}/100 \text{ Sqft}$ ]
- viszkozitás [cP]

## 6. A mérési eredmények

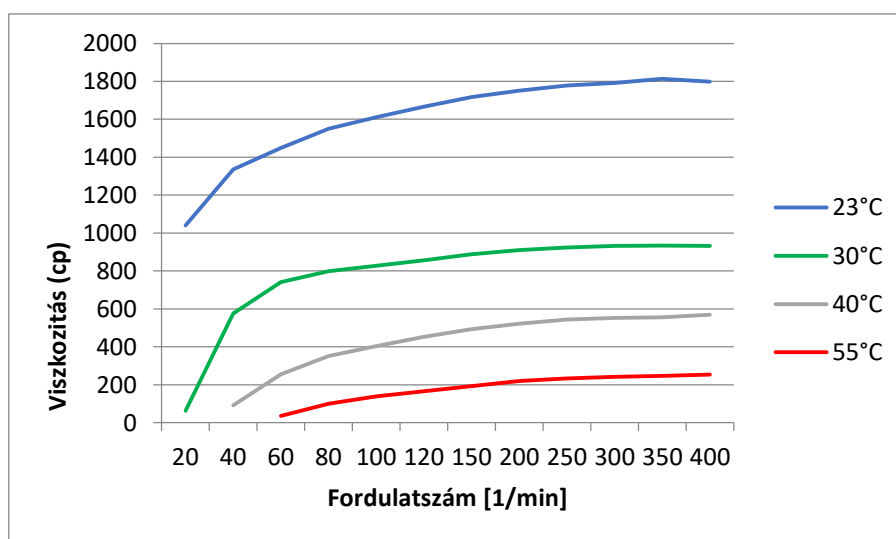


3. ábra. A glicerín viszkozitása négy hőmérsékleten a fordulatszám függvényében

A méréseinket különböző tömegszázalékos mintán, négy hőmérsékleten (23 °C, 30 °C, 40 °C, 55 °C) és különböző fordulatszámokon (20, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 200, 250, 300, 350, 400 1/min) végeztük el. Méréseinként kb. 7800-8000 adatsort kaptunk, amelyeket Excel táblázatban rögzítettünk és a viszkozításra vonatkozó eredményeket Excelben értékeltük ki.

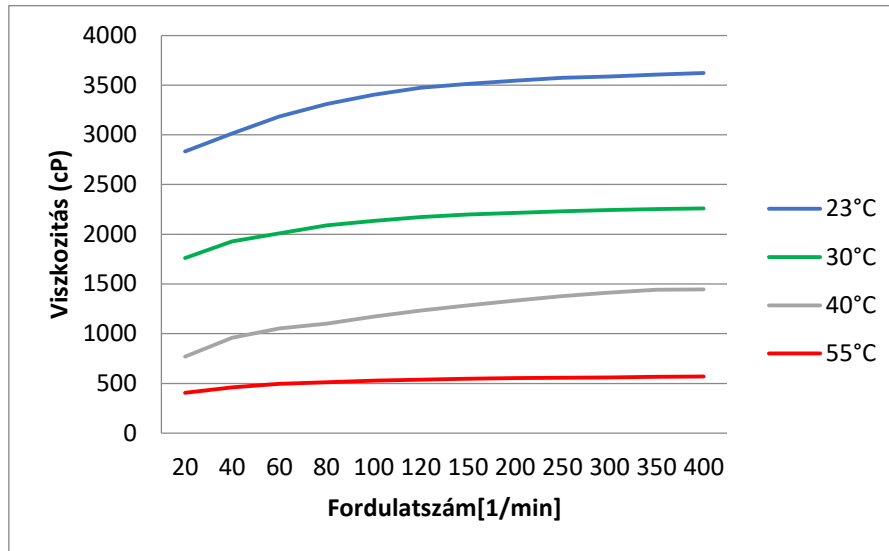
### 6.1. A kenőanyagminták viszkozitásának változása a fordulatszám függvényében

A tiszta glicerínre végzett két mérés eredményeit a 3-5. ábrák ábrázolják. Glicerín és nanocsövek keverékét tartalmazó kenőanyagokra 0,1; 0,2; 0,5 és 1 m%-os mintákból 5-5 mérést végeztünk. Az alábbi ábrák az átlagolt és összesített grafikonokat mutatja a négyféle anyagra.





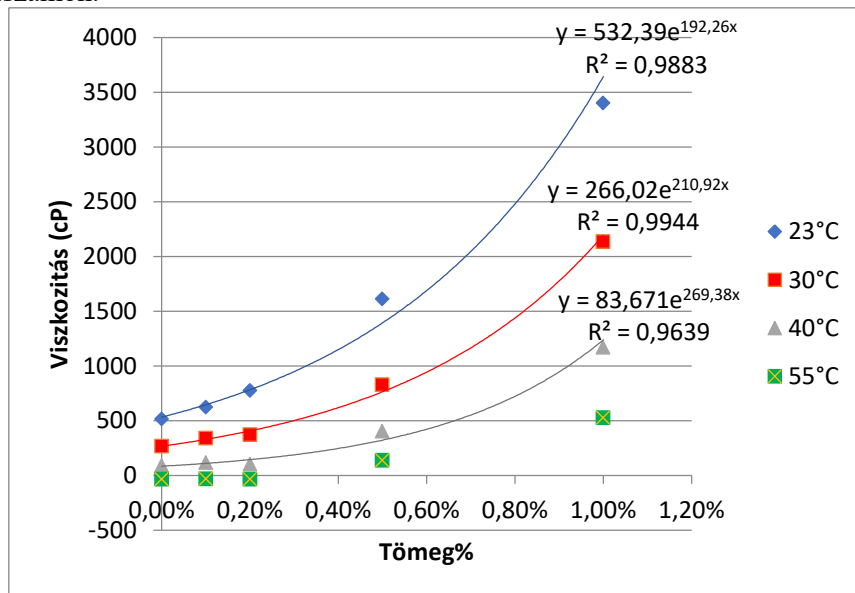
4. ábra. Kenőanyag viszkozitás négy hőmérsékleten a fordulatszám függvényében (0,5 m%)



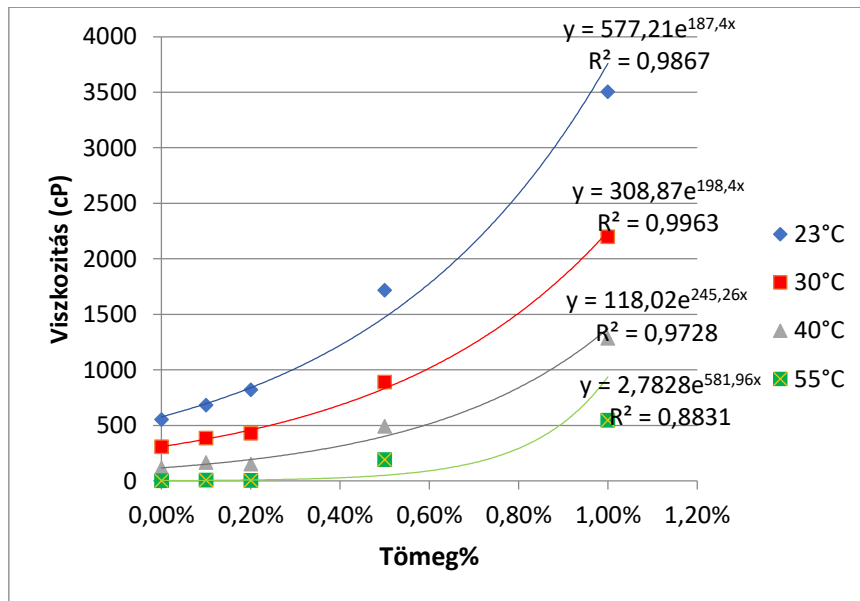
5. ábra. Kenőanyag viszkozitás négy hőmérsékleten a fordulatszám függvényében (1 m%)

## 6.2 A kenőanyagminták viszkozitásának változása a tömegszázalék függvényében

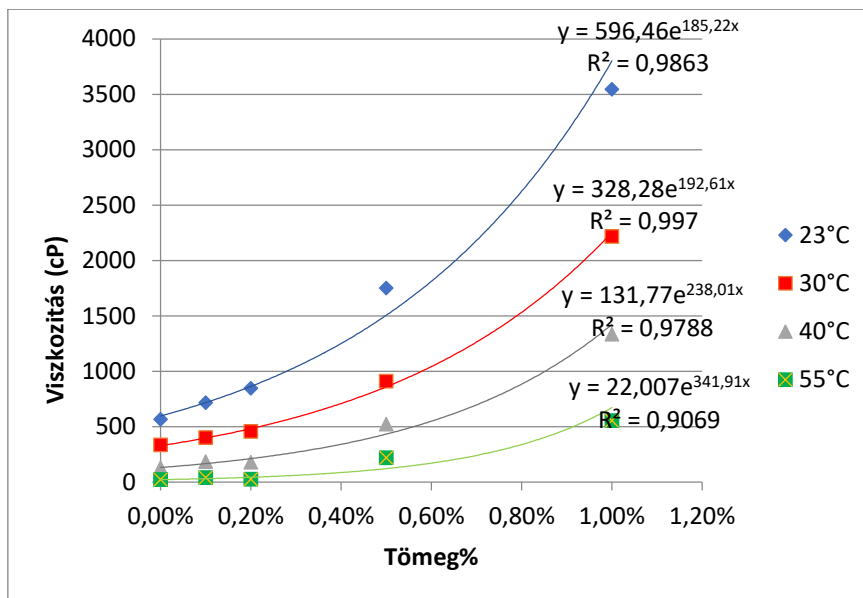
A viszkozitás változását grafikonokkal szemléltetjük egy-egy fordulatszám esetén 100, 150 és 200 1/min fordulatszámon.



6. ábra. Kenőanyag viszkozitás négy hőmérsékleten a tömegszázalék függvényében (100 min<sup>-1</sup>)



7. ábra. Kenőanyag viszkozitás négy hőmérsékleten a tömegszázalék függvényében ( $150 \text{ min}^{-1}$ )

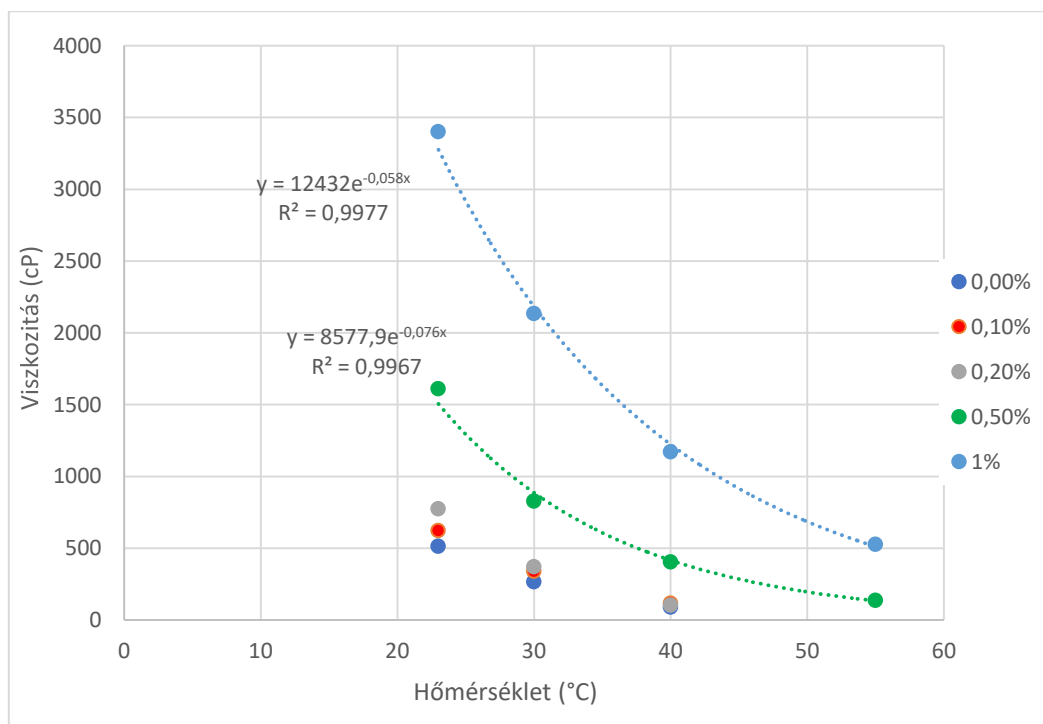


8. ábra. Kenőanyag viszkozitás négy hőmérsékleten a tömegszázalék függvényében ( $200 \text{ min}^{-1}$ )

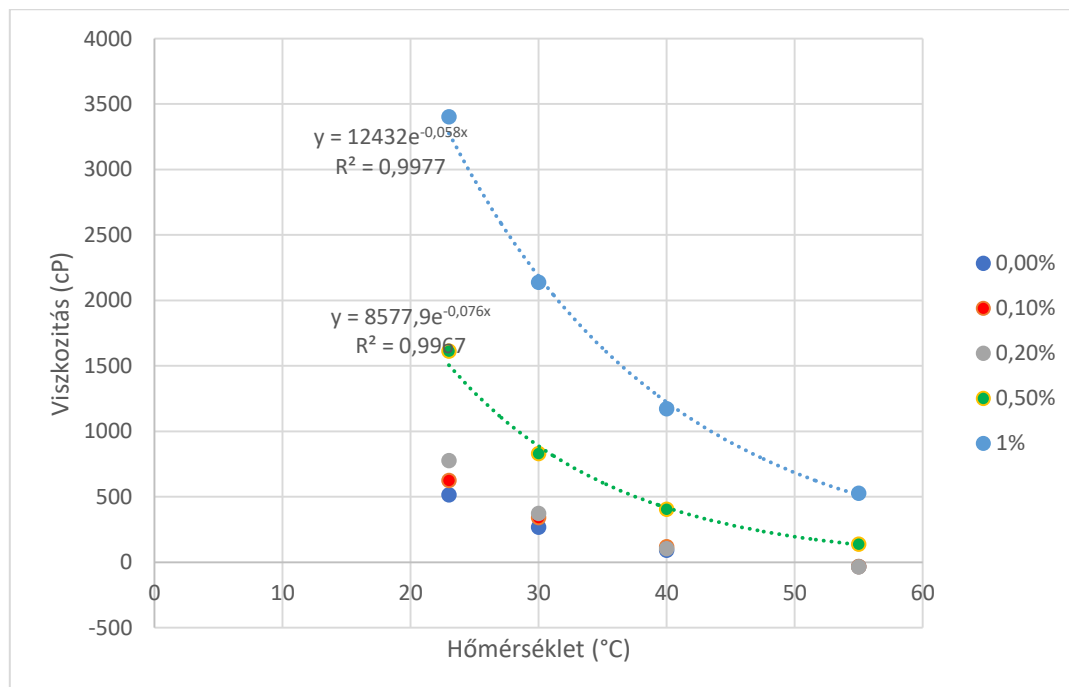
A felvett trendvonalak exponenciális jelleget mutatnak, ahol megfigyelhető, hogy az exponenciális kitevő a hőmérséklet növelésével csökken. Továbbá a korrelációs tényező is jelentősen romlik a hőmérséklet növelésével.

### 6.3 A vizsgált kenőanyagminták viszkozitásának változása a hőmérséklet függvényében

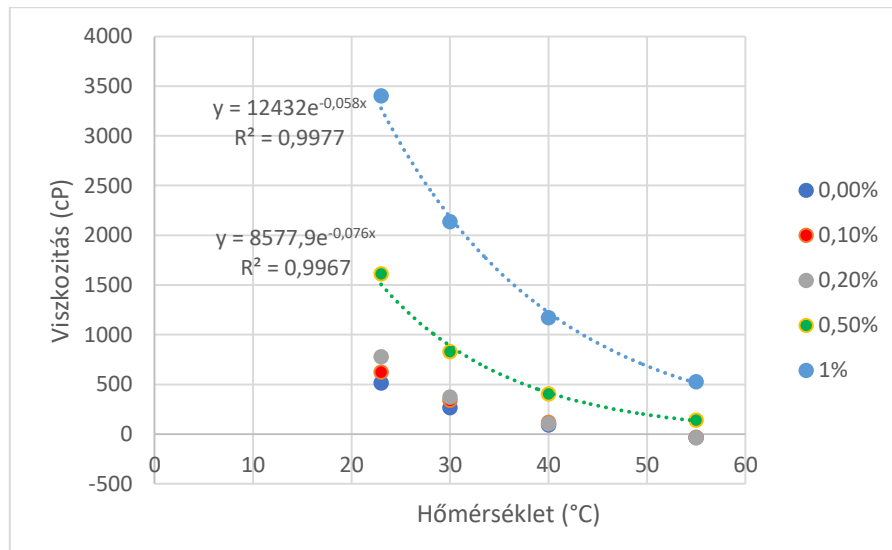
Az alábbiakban megmutatjuk, hogy a viszkozitás az előzően kiválasztott három fordulatszámra hogyan változik a hőmérséklet függvényében. A 9-11. ábrákon exponenciálisan csökkenő viszkozitás trendeket figyelhetünk meg.



9. ábra. Kenőanyag viszkozitás négy hőmérséklet függvényében ( $100 \text{ min}^{-1}$ )



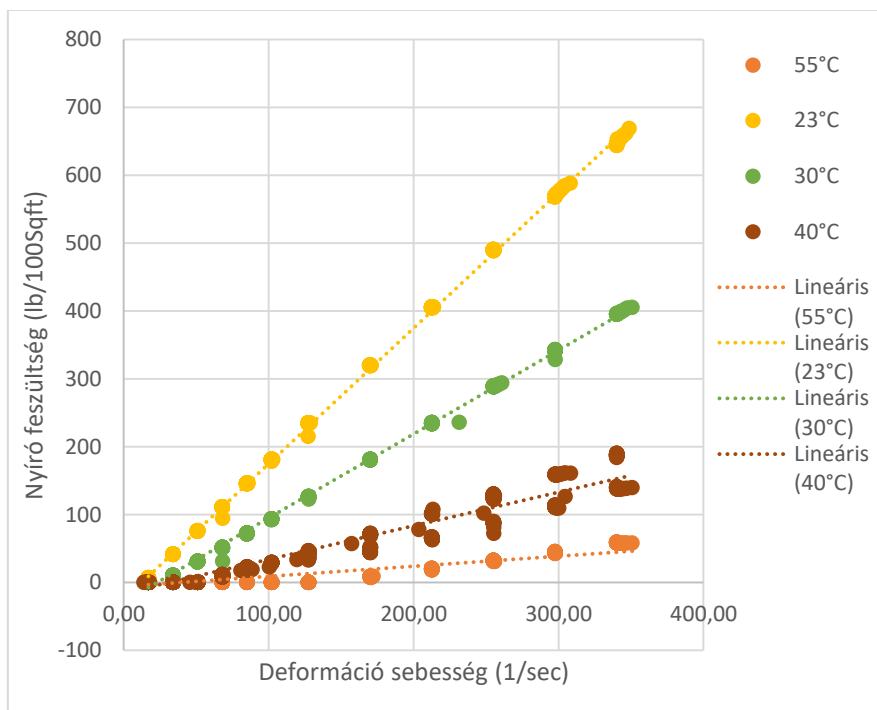
10. ábra. Kenőanyag viszkozitás négy hőmérséklet függvényében ( $150 \text{ min}^{-1}$ )



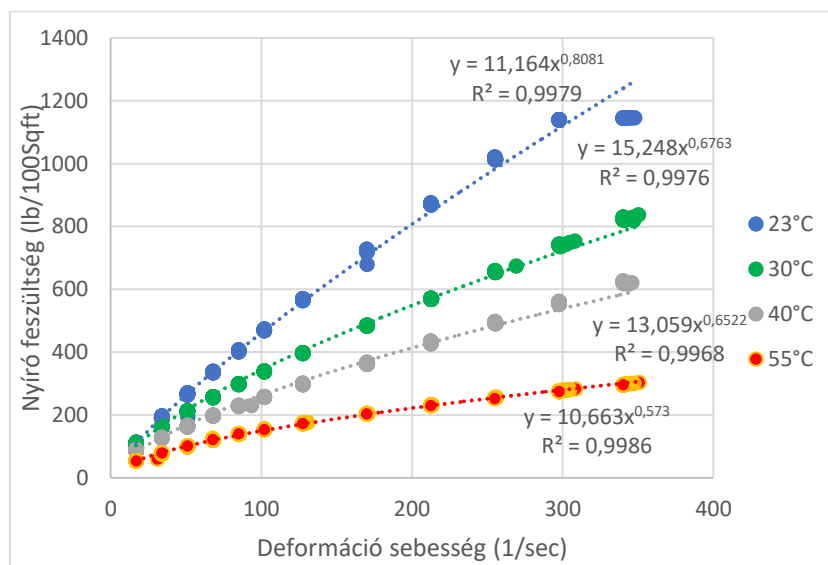
11. ábra. Kenőanyag viszkozitás négy hőmérséklet függvényében ( $200 \text{ min}^{-1}$ )

#### 6.4 A nyírófeszültség változása a deformációsebesség függvényében

A tiszta glicerinre és az 1 m%-os kenőanyagra egy-egy ábrában ábrázoltuk a nyírófeszültség változását a deformációsebesség függvényében. Megfigyeltük a tiszta glicerinre a newtoni jelleget, melyet az (1) egyenlet fejez ki.



12. ábra. A nyírófeszültség változása a deformációsebesség függvényében glicerinre



13. ábra. A nyírófeszültség változása a deformációsebesség függvényében 1 m% kenőanyagra

A legtöbb nanocsövet tartalmazó kenőanyag esetén viszont a pszeudoplasztikus jelleg jelentkezik. A (2) egyenlet szerinti hatványtörvény szerinti összefüggés 0,99 értékű korrelációt mutat. A pszeudoplasztikus jelleget jelző  $n$  kitevő a hőmérséklet emelésével csökken.

1. táblázat. Az  $n$  kitevő változása a hőmérséklet függvényében

T [°C]	23	30	40	55
$n$	0,8081	0,6763	0,6522	0,573

## 7. Összefoglalás

Összefoglalva megállapításainkat:

A viszkozitás egy-egy hőmérséklet értéken növekszik a fordulatszám növelésével.

A viszkozitás csökken a hőmérséklet emelésével.

A viszkozitás a szén nanocsövek tömegszázalékának növelésével exponenciálisan nő.

A viszkozitás a hőmérséklet növelésével exponenciálisan csökken.

A glicerín nyírófeszültsége egyenesen arányos a deformációsebességgel.

A kenőanyag pszeudoplasztikus jellegét mutat, a nyírófeszültség hatványtörvényszerinti összefüggésében a kitevő a hőmérséklet növelésével csökken.

## Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Továbbá köszönetet mondunk Dr. Vanyorek Lászlónak, aki a méréshez szükséges MWCNT-t biztosította számunkra.

**Felhasznált irodalom**

- [1] Bashirnezhad, K.: *Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies*, Int. Commun. Heat Mass Transf., 2016 <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.02.005>
- [2] Maxwell, J.C.: *Electricity and Magnetism*, Clarendon, Oxford, UK, 1873
- [3] Mahbubul, I.M., Saidur, R., Amalina, M.A.: *Investigation of viscosity of R123-TiO<sub>2</sub> nanorefrigerant*, Int. J. Mech. Mater. Eng. 7, 2012
- [4] Ranakoti, G., Irtisha, S.D., Kosti, S., Nemade, R.: *Heat transfer enhancement by nano fluids*, ME642-Convective heat and mass transfer, 2012
- [5] Murshed, S.M.S., Leong, K.C., Yang, C.: *Enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>-water based nanofluids*, Int. J. Therm. Sci. 2005, 44:367-73.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.12.005>
- [6] Liu, M.S., Ching-Cheng Lin, M., Huang, I.T., Wang, C.C.: *Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids*, Int. Commun Heat Mass Transf. 2005, 32:1202-10. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.005>
- [7] Kole, M., Dey, T.K.: *Role of interfacial layer and clustering on the effective thermal conductivity of CuO-gear oil nanofluids*, Exp. Therm. Fluid Sci., 56:45-53, 2011
- [8] Zhang, Q., Chen, G., Yoon, S.F, Ahn, J., Wang, S.G., Zhou, Q.: *Thermal conductivity of multiwalled carbon nanotubes*, Phys. Rev. B. 2002, 66:165-440.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.165440>
- [9] Teng, T.P., Hung, Y.H., Teng, T.C., Mo, H.E., Hsu, H.G.: *The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity*, Appl. Therm. Eng. 2010, 9: 707-718.
- [10] Xie, H.Q., Wang, J.C., Xi, T.G., Liu, Y.: *Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles*, Int. J. Thermophys. 2002, 23:571-80.
- [11] Hung, Y.H., Chou, W.C.: *Chitosan for suspension performance and viscosity of MWCNTs 2012*, 3:5. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2012.V3.215>
- [12] Suganthi, K.S., Rajan, K.S.: *Temperature induced changes in ZnO – water nanofluid: zeta potential, size distribution and viscosity profiles*, Int. J. Heat Mass Transf. 2012, 55:7969-7980.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.08.032>
- [13] Syam Sundar, L., Singh, M.K., Sousa, A. *Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid for heat transfer applications*, Int. Commun. Heat Mass Transf. 2013, 20:23-35. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.02.014>
- [14] Halelfadl, S., Estellé, P., Aladag, B., Doner, N., Maré, T.: *Viscosity of carbon nanotubes water-based nanofluids: influence of concentration and temperature*, Int. J. Therm. Sci. 2013, 71:111-117. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.04.013>
- [15] Said, Z., Saidur, R., Hepbasli, A., Rahim, N.A.: *New thermophysical properties of water based TiO<sub>2</sub> nanofluid—the hysteresis phenomenon revisited*, Int. Commun Heat Mass Transf. 2014, 58:85-95. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.08.034>
- [16] Kole, M., Dey, T.K.: *Effect of aggregation on the viscosity of copper oxide-gear oil nanofluids*, Int. J. Therm. Sci. 2011, 56:45-53.
- [17] Nabeel Rashin, M., Hemalatha, J.: *Viscosity studies on novel copper oxide-coconut oil nanofluid*, Exp. Therm. Fluid Sci. 2013, 48:67-72.  
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.02.009>
- [18] Khedkar, R.S., Kiran, A.S., Sonawane, S.S., Wasewar, K., Umre, S.S.: *Thermo-Physical Characterization of Paraffin based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanofluids*, Procedia Eng. 2013, 51:342-6.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.047>

- [19] Moghaddam, M.B., Goharshadi, E.K., Entezari, M.H., Nancarrow, P.: *Preparation, characterization, and rheological properties of graphene–glycerol nanofluids*, Chem. Eng. J. 2013, 231:365-72. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.07.006>
- [20] James, M. McKelvey: *Polimerek feldolgozása*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1966
- [21] <https://slideplayer.hu/slide/12776366/>
- [22] Devendiran, D.K., Amirtham, V.A.: *A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids* 2016, Madurai 625015, India, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.055>
- [23] Einstein, A.: *Investigations on the theory of the Brownian motions*, New York: Dover Publications; 1956
- [24] Garg, J., Poudel, B., Chiesa, M., Gordon, J., Ma, J.J., Wang, J.B., Ren, Z.F., Kang, Y.T., Ohtani, H., Nanda, McKinley, J., Chen G.H.G.: *Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid*, J. Appl. Phys. 2008, 103:7401-1-6. <https://doi.org/10.1063/1.2902483>
- [25] Chen, L., Xie, H., Li, Y., Yu, W.: *Nanofluids containing carbonnanotubes treated by mechanochemical reaction*, Thermochim Acta 2008, 477:21-4. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.08.001>
- [26] Li, J.M., Li, Z.L., Wang, B.X.: *Experimental viscosity measurements for copper oxide nanoparticles suspensions*, Tsinghua Sci. Technol. 2002, 7:198-201.
- [27] Mahian, O., Kianifar, A., Kleinstreuer, C., Al-Nimr, M.A., Pop, I., Sahin, A.Z., Wongwises, S.: *A review of entropy generation in nanofluid flow*, Int. J. Heat Mass Transf. 2013, 65:514-532. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.010>
- [28] Mahbulul, I.M., Saidur, R., Amalina, M.A.: *Latest developments on the viscosity of nanofluids*, Int. J. Heat Mass Transf. 2012, 55:874-885. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.021>
- [29] Khanafer, K., Vafai, K.: *A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids*, Int. J. Heat Mass Transf. 2011, 54:4410-4428. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.048>
- [30] Chandra Mishra, P., Mukherjee, S., Kumar Nayak, S., Arabind, P.: *A brief review on viscosity of nanofluids*, Int. Nano Lett. 2014. <https://doi.org/10.1007/s40089-014-0126-3>
- [31] Garg, P., Alvarado Jorge, L., Marsh, C., Carlson, T.A., Kessler, D.A., Kalyan, A.: *An experimental study on the effect of ultrasonication on viscosity and heattransfer performance of multiwall carbon nanotube-based aqueous nanofluids*, Int. J. Heat Mass Transf. 2009, 42:252-257.
- [32] Rad, S., Goodarz, A., Hussein, T., Mahidzal, D., Salim, N.K., Emad, S., Nashrul Z.: *An experimental study on thermal conductivity and viscosity of nanofluids containing carbon nanotubes*, Kuala Lumpur 50603, Malaysia, 2014.
- [33] Hilding, J., Grulke, E.A., Zhang, Z.G., Lockwood, F.: *Dispersion of carbon nanotubes in liquids*, J. Dispers Sci. Technol. 2003, 381:17-23.
- [34] Abdullah, M. I. H. C., Abdollah, M. F. B., Tamaldin, N., Mat Nuri, N. R.: *Effect of hexagonal boron nitride nanoparticles as an additive on the extreme pressure properties of engine oil*, Industrial Lubrication and Tribology, 2016 <https://doi.org/10.1108/ILT-10-2015-0157>
- [35] Abdollah, M.F.B., Mazlan, M.A.A., Amiruddin, H., Tamaldin, N.: *Experimental study on friction and wear behaviors of ball bearings under gas lubricated conditions*, Journal Technology, 2014 <https://doi.org/10.11113/jt.v66.2693>

- [36] Tee, B.T., Yong, K.F., Imran, S.M., Chong, C.T.: *Investigation on tribological properties of carbon nanotubes as natural oil-based lubricant additive*, Malaysia, 2017
- [37] Prathima, C., Nalam Jarred, N., Clasohm, A.M., Spencer, N.D.: *Macrotribological Studies of Poly(L-lysine) – graft – Poly (ethylene glycol) in Aqueous Glycerol Mixtures*, Springer Science+Business Media, LLC, 2009
- [38] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Glicerin>
- [39] Vanyorek, L., Meszaros, R., Barany, S.: *Surface and electro-surface characterization of surface-oxidized multi-walled N-doped carbon nanotube*, Miskolc, Hungary, 2014  
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.01.078>

INTERNETES LINKEK UTOLSÓ ELLENŐRZÉSE: 2019. 04. 09.