

Juraj Kurimský, Roman Cimbala, Michal Rajňák

## Experimentálne overenie zvýšenia tepelnej vodivosti transformátorového oleja pridaním nanočastíc

Prenos tepla je jedným z faktorov vplyvujúcich ako na efektívnosť prevádzky elektroenergetických zariadení, tak aj na ich životný cyklus. V týchto zariadeniach sa dielektrické kvapaliny využívajú nie len na galvanické oddelenie rôznych potenciálov, ale aj na prenos zvyškového tepla, najmä Jouleových strát, vznikajúcich pri výrobe, prenose a distribúcii, a pri spotrebe elektrickej energie. Článok sa zaoberá pozorovaním tepelnej vodivosti transformátorového oleja s nízkym obsahom síry, vyrobeného technológiou gas-to-liquid. Je skúmaná zmena tejto veličiny vplyvom prímiesi nanočastíc fullerénu a magnetitu. Sú prezentované porovnania v tepelnej škále od 30 do 70 °C, v ktorej je dosiahnuté sľubné zvýšenie tepelnej vodivosti o viac ako 2%.

**Kľúčové slová:** transformátorový olej; nanokvapalina; fullerén; magnetit; tepelná vodivosť.

### I. ÚVOD

Vo zvýšenej miere zaznamenávame nepriaznivé dôsledky vplyvu ľudskej činnosti na zmeny klimatických podmienok a narastajúce ohrozenie v dôsledku prebiehajúceho globálneho otepľovania. Čelíme aj ekologickým problémom, súvisiacich najmä s produkciou CO<sub>2</sub>, znečistením ovzdušia a nízkou energetickou účinnosťou súčasných technológií. Je známe, že Európska stratégia energetickej reformy stojí na: (1) na energetickej bezpečnosti, (2) na integrovanom trhu s energiami, (3) na energetickej efektívnosti, (4) na dekarbonizácii ekonomiky a (5) na výskume a inováciách.

Výskum a inovácie v oblasti energetickej efektívnosti sa vo veľkej miere opierajú o využitie nanotechnológií. V oblasti premeny elektrickej energie zohrávajú významnú rolu izolačné kvapaliny, ktoré plnia ako funkciu galvanického oddelenia obvodov, tak aj média pre prenos zvyškového tepla, ktoré vzniká pri prevádzke energetických zariadení.

Prenos tepla zohráva dôležitú úlohu v mnohých oblastiach priemyslu, ako je výroba elektrickej energie, chladenie energetických systémov, doprava a mikroelektronika v dôsledku zohrievania a chladenia polovodičových súčiastok. Jedným z hlavných a najdôležitejších parametrov prenosu tepla je tepelná vodivosť [1]. Tepelná vodivosť materiálov určuje ako a kde je výhodné daný materiál použiť. Materiály s nízkou tepelnou vodivosťou sú vynikajúce pri izolácii stavieb a podnikov, zatiaľ čo materiály s vysokou tepelnou vodivosťou sú ideálne pre aplikácie, kde je potrebné rýchlo a efektívne prenášať teplo z jednej oblasti do druhej, ako napríklad chladiace systémy. Výberom materiálov s tepelnou vodivosťou vhodnou pre danú aplikáciu, môžeme dosiahnuť najlepší možný výkon a najmenšie možné straty [2]. Vo všetkých spomenutých oblastiach priemyslu a najmä v oblasti elektroenergetiky sa najčastejšie používa ako chladiace médium kvapalina. Táto práca sa preto bude podrobnejšie venovať tepelnej vodivosti kvapalín, ale hlavne meraniu tepelnej vodivosti kvapalín, ktoré sa používajú v elektroenergetike, ako sú napríklad transformátorové oleje, ale aj rôzne iné chladiace média.

### II. ZLEPŠENIE PRENOSU TEPLA V PROCESOCH

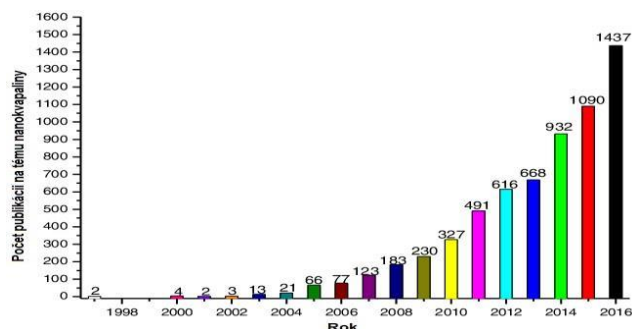
Udržateľnosť technológií a šetrný prístup k prostrediu patria k hlavným motívom pre vznik nových prístupov na zlepšenie prenosu tepla v procesoch tak, aby bola minimalizovaná na tento účel potrebná

externá energia. Vo všeobecnosti existujú dva prístupy, ktoré sú označované ako pasívne alebo aktívne.

Medzi pasívne techniky patrí zlepšenie vlastností chladiacich kvapalín a materiálov, zväčšenie plochy chladiacich elementov, čím sa dosiahne lepšie odvádzanie prebytočného tepla do chladiacej kvapaliny a iné konštrukčné úpravy, ktoré na zvýšenie rýchlosti prenosu tepla nepotrebujú žiadnu sekundárnu energiu. Aktívne techniky vyžadujú pomocnú energiu na zvýšenie prenosu tepla, ako napríklad zvýšenie výkonu ventilátorov a podobne. Keďže úspora energie je z environmentálneho pohľadu na prvom mieste, pasívne techniky vždy získavajú pozornosť ako prvé [2].

### III. NANOKVAPALINY, MERANIE TEPELNEJ VODIVOSTI

Vynikajúcou pasívnou technikou na zlepšenie tepelných vlastností kvapalín je pridávanie vysoko tepelne vodivých pevných častíc do kvapaliny. Nanokvapalina je druh zriedenej suspenzie obsahujúcej nanočastice, ktorých charakteristická veľkosť je menšia ako 100 nm. Experimentálne sa zistilo, že keď veľkosť častíc v suspenzii dosiahne úroveň nanometrov, výsledná suspenzia vykazuje zvýšenú tepelnú vodivosť ako čistá kvapalina a súčasne vytvára stabilnejšiu zmes, ako zmes častíc o veľkosti milimeter alebo mikrometer. Nanočastice v kvapaline môžu dokonca zlepšiť nielen tepelnú vodivosť, ale aj tepelnú kapacitu kvapaliny. Stabilná nanokvapalina môže tiež získať lepšiu likviditu a niekedy ju možno považovať za jednofázovú kvapalinu [3,4]. V posledných dvoch desaťročiach, no najmä za posledných 10 rokov badať rapidný nárast počtu publikácií s kľúčovým slovom „nanokvapalina alebo nanokvapaliny“ [4], obr. 1.



Obr. 1. Počet publikácií obsahujúcich slovo „nanokvapalina“ [4].

Meranie tepelnej vodivosti je možné vykonať pomocou aparatury, ktorá buď kompenzuje, alebo vyvolá zanedbateľné tepelné účinky v dôsledku prenosu tepla prúdením a sálaním. Pri meraní tepelnej vodivosti v kvapalinách sa používajú dva základné princípy. (1) Prvý princíp spočíva v odstránení časovej závislosti z Fourierovej rovnice pre prestup tepla vedením. (2) Druhým princípom je vykonanie merania tepelnej vodivosti kvapaliny v čase, keď kvapalina z hľadiska teploty nie je v ustálenom stave. Takto možno rozdeliť metódy merania tepelnej vodivosti [5]:

- metódy v ustálenom tepelnom stave (z angl. steady state methods),
- metódy v prechodnom tepelnom stave (z angl. non steady state methods).

V ďalšom texte prezentujeme výsledky experimentálneho pozorovania zvýšenia tepelnej vodivosti transformátorového oleja pomocou prímеси nanočastíc v laboratórnych podmienkach.

#### IV. MATERIÁLY A METÓDY

Základná izolačná kvapalina bola založená na transformátorovom oleji SHELL DIALA S4, vyrobenom technológiou skvapalnenia zemného plynu. Tento olej vykazuje oproti iným druhom olejov vysoké hodnoty tepelnej vodivosti a je vhodný pre silne zaťažené technológie. Jeho vybrané vlastnosti sú v Tab. 1.

TABUĽKA I  
SHELL DIALA S4: vybrané fyzikálne vlastnosti

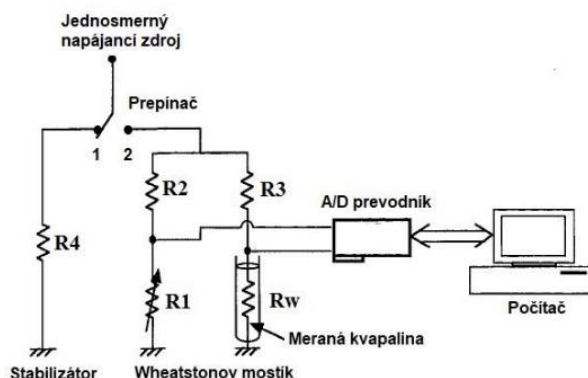
Vlastnosť	Typická hodnota
Hustota @20°C (kg/m <sup>3</sup> )	805
Viskozita @40°C (mm <sup>2</sup> /s)	9,9
Viskozita @-30°C (mm <sup>2</sup> /s)	523
Bod vznietenia (°C)	191
Prierné napätie (kV)	70
Stratový činiteľ @90°C (-)	0,001
Obsah vody (mg/kg)	8
Tepelná vodivosť W/m/K (@20°C)	0,137

Z vyššie predstavenej základnej kvapaliny boli pripravené dve nanokvapaliny. Prvá je mono-nanokvapalina pozostávajúca z nanočastíc fullerénu C<sub>60</sub> dispergovaných v oleji s koncentráciou nanočastíc 0,01 % hm./obj. (g/100mL). Sférická molekula C<sub>60</sub> pozostáva zo 60 atómov uhlíka (tzv. Buckminster fullerén), ktoré sú usporiadané do štruktúry pripomínajúcej futbalovú loptu [6]. Druhá nanokvapalina je hybridná, ktorá obsahuje okrem fullerénu aj nanočastice magnetitu Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> s koncentráciou 0,01 %hm./obj. Obe nanokvapaliny vykazovali dlhodobú chemickú stabilitu. Na obr. 2 sú pripravené vzorky, zľava: základná kvapalina, mono-nanokvapalina a hybridná nanokvapalina.



Obr. 2. Vzorky: základná kvapalina, mono-nanokvapalina a hybridná nanokvapalina.

Tepelná vodivosť nanokvapalín bola zisťovaná metódou horúceho drôtu, angl. hot wire technique. Princíp je znázornený na obr. 3.



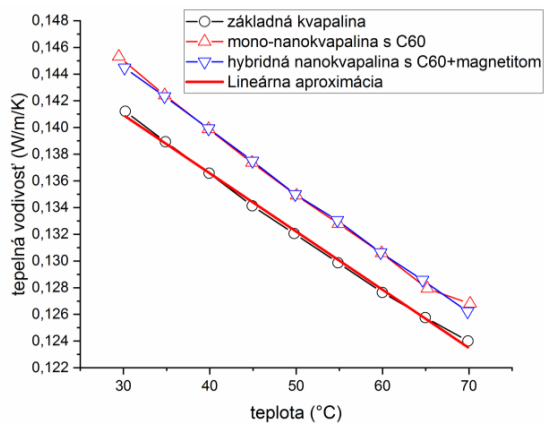
Obr. 3. Princíp zisťovania tepelnej vodivosti metódou horúceho drôtu [7].

Metóda horúceho drôtu určuje tepelnú vodivosť vzorky kvapaliny na základe skúmania zvýšenia teploty tenkého, zvislého, dlhého, odporového drôtu ponoreného do vzorky meranej kvapaliny. V praxi sa ako drôt používa platinový, niklový alebo nichromový drôt s priemerom rádovo desiatky  $\mu\text{m}$ . Tenký odporový drôt súčasne vykonáva funkciu zdroja tepla a slúži aj ako odporový teplomer. Odporový drôt, v schéme označený ako  $R_w$ , je ponorený do meranej kvapaliny a za normálnych okolností sa nachádza v tepelnej rovnováhe s okolím (prepínač je v polohe 1). Prepnutím prepínača do polohy 2 sa do drôtu privádza konštantný impulz prúdu. Tento impulz prúdu spôsobí zahriatie drôtu vplyvom Joulových strát v ňom a súčasne spôsobí aj zahriatie meranej kvapaliny. Nárast teploty meranej kvapaliny závisí od tepelnej vodivosti kvapaliny, do ktorej je vložený horúci drôt. Tepelná vodivosť vzorky kvapaliny sa následne vypočíta z gradientu zvýšenia teploty drôtu oproti logaritmickej časovej závislosti. Zvýšenie teploty drôtu, ktoré je reprezentované zvýšením elektrického odporu drôtu sa zvyčajne meria pomocou Wheatstoneovho mostíka ( $R_w, R_1, R_2, R_3$ ). Na prevod analógových údajov na digitálne údaje sa použije A/D prevodník. Teplotný rozdiel sa vypočíta z teplotného koeficientu odporu použitého drôtu a z nameraných hodnôt odporu. Namerané údaje sa následne ukladajú do počítača na ďalšiu analýzu [7].

#### V. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Výsledky meraní tepelnej vodivosti sú uvedené na obr. 4. Z grafu sa dá usúdiť, že v teplotnom rozsahu od 30 do 70°C sa charakter teplotnej závislosti tepelnej vodivosti skúmaných kvapalín výrazne nelíši. Je možné pozorovať kvázi lineárny pokles tepelnej vodivosti so zvyšujúcou sa teplotou pre všetky vzorky. Z lineárnej aproximácie je sklon fitovanej priamky  $-4,36 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})/\text{K}$ .

Tepelné vodivosti oleja a nanokvapalín sú odlišné. Pridanie nanočastíc do základného transformátorového oleja spôsobilo jej zvýšenie o viac ako 2%. Tepelné vodivosti dvoch nanokvapalín sú takmer rovnaké v rámci dosiahnutej chyby merania. Možno hypoteticky predpokladať, že dominantný účinok na zvýšenie tepelnej vodivosti spôsobujú nanočastice fullerénu, zatiaľ čo príspevok magnetitu sa javí ako zanedbateľný. Ostáva otvorenou otázkou, či by sa to zmenilo pri podstatnom zvýšení koncentrácie magnetických nanočastíc.



Obr. 4 Tepelná vodivosť základnej kvapaliny, mono- a hybridnej nanokvapaliny v závislosti na teplote.

## VI. ZÁVER

V článku je predstavený vplyv pridaných nanočastíc na tepelnú vodivosť kvapaliny vyrobenej technológiou gas-to-liquid. Bolo zistené, že pri koncentrácii 0,01 %hm./obj. má na tepelnú vodivosť prevládajúci vplyv prímies fullerénu C<sub>60</sub>. Otázkou otvorenou pre ďalšie pozorovania ostáva zvyšovanie koncentrácie magnetitových nanočastíc nad doteraz aplikované pomery. Dosiahnuté zvýšenie tepelnej vodivosti však predstavuje sľubný výsledok z hľadiska zlepšenia tepelných režimov zariadení prevádzkovaných pri veľkých výkonoch.

## POĎAKOVANIE

Financovanie: Táto práca bola finančne podporená Agentúrou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektov VEGA 2/0011/20 a 1/154/21 a Agentúrou na podporu vedy a výskumu v rámci projektu APVV-22-0115.

Dopady: práca je dopadom implementácie projektu v rámci operačného programu Výskum a inovácie pre projekt: Inovatívne postupy testovania pre priemysel 21. storočia ITMS: 313011T565, ktorý bol spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

## LITERATÚRA

- [1] Martínez YC, Legal D. Experimental study of thermal conductivity of new mixtures for absorption cycles and the effect of the nanoparticles addition. 2013.
- [2] Akhilesh M, Santarao K, Babu MVS. Thermal Conductivity of CNT - Water Nanofluids: a Review. *Mechanics and Mechanical Engineering* 2018;22:207–20. <https://doi.org/10.2478/mme-2018-0019>.
- [3] Hussien IA. Using the nanofluid to improve the heat transfer in the double pipe heat exchanger. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 2018;9:580–91.
- [4] Yang L, Hu Y. Toward TiO<sub>2</sub> Nanofluids—Part 1: Preparation and Properties. *Nanoscale Res Lett* 2017;12:417. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2184-8>.
- [5] LI SFY. The Thermal Conductivity of Liquid Hydrocarbons. PhD. Imperial College of Science and Technology, 1984.
- [6] Ramsden J. *Nanotechnology: an introduction*. Oxford ; Waltham, MA: William Andrew/Elsevier; 2011.
- [7] Loong TT, Salleh H. A review on measurement techniques of apparent thermal conductivity of nanofluids. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 2017;226:012146. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/226/1/012146>.

## ADRESY AUTOROV

Juraj Kurimský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: juraj.kurimsky@tuke.sk

Roman Cimbala, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: roman.cimbala@tuke.sk

Michal Rajňák, Ústav experimentálnej fyziky SAV, v. v. i., Watsonova 47, 040 01 Košice, E-mail: rajnak@saske.sk