

Ján Zbojovský, Ardian Hyseni

Súčasný smery v získavaní energie prostredníctvom magnetických kvapalín

Abstrakt Článok pojednáva o aktuálnych trendoch v oblasti získavania energie prostredníctvom magnetických kvapalín. Nachádza sa tu vybraný prehľad doteraz realizovaných výskumov, rôzne smery možnosti získavania energie ako získavanie energie na základe termoelektrického javu, získavanie energie v slnečných kolektoroch na základe premeny slnečnej energie-teplná energia, a získavanie energie na základe prúdenia magnetickej kvapaliny.

Kľúčové slová: magnetická kvapalina, energia, nanočastice, seebeckov koeficient, ZT, termoelektrický jav, iónové kvapaliny.

Abstract The article discusses current trends in the field of energy harvesting through magnetic fluids. There is an overview of the research carried out so far, the different directions of energy harvesting possibilities such as energy harvesting based on thermoelectric phenomena, energy harvesting in solar collectors based on solar energy-thermal energy conversion, and energy harvesting based on magnetic fluid flow.

Keywords: magnetic fluid, energy, nanoparticles, Seebeck coefficient, ZT, thermoelectric phenomena, ionic liquids

I. ÚVOD

Jedinečné vlastnosti magnetických nanočastíc (MNP) a ich interakcie s okolím priniesli inovatívne možnosti výskumu a vývoja mimo oblasti konvenčného magnetizmu. Jedným z takýchto príkladov je oblasť energetiky. V tejto súvislosti sa v posledných desaťročiach venovala veľká pozornosť výskumu technológie chladenia založenej na magnetokonvekčnej vlastnosti fero kvapalín (FK). Na druhej strane, termoelektrická premena energie (alebo častejšie známa ako "termoenergia") vo fero kvapalinách zostala doteraz nedostatočne preskúmaná. Termoelektrické (TE) materiály sú schopné priamo premieňať tepelnú energiu na elektrickú. Ako také môžu ponúknuť možné riešenie pre nízkoenergetické odpadové teplo na všetkých úrovniach ľudskej činnosti, od priemyselného odpadu, spaľovacích motorov automobilov, elektronických zariadení až po telesné teplo. TE moduly na báze pevných polovodičov sa začali komerčne využívať pred mnohými desaťročiami a dodnes sú na trhu s TE dominantné. Napriek ich technickým výhodám vrátane jednoduchého používania bez pohyblivých častí a vysokej spoľahlivosti je však technológia TE stále obmedzená na aplikácie s nízkym výkonom z dôvodu ich nízkej účinnosti. Tá sa vo všeobecnosti vyjadruje bezrozmerným parametrom nazývaným "figure of merit" ZT . ZT kombinuje tri transportné vlastnosti materiálov, a to elektrickú vodivosť σ , tepelnú vodivosť κ a Seebeckov (termoelektrický) koeficient S_e

$$ZT = (\sigma S_e^2 / \kappa) T \quad (1)$$

kde T je prevádzková teplota a Seebeckov koeficient je definovaný takto:

$$S_e = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2)$$

ΔV je rozdiel potenciálov vytvorený v materiáli ako reakcia na teplotný gradient ΔT . Hovorí sa, že hodnoty ZT väčšie ako 4 sú potrebné na to, aby TE zariadenia boli konkurencieschopné voči iným technológiám obnoviteľnej energie (napr. solárnej a geotermálnej) [1]. Na dosiahnutie tohto cieľa sa v posledných 20 rokoch venovalo obrovské množstvo výskumného úsilia nanoštruktúrovaníu TE materiálov na báze polovodičov, pričom cieľom bolo predovšetkým

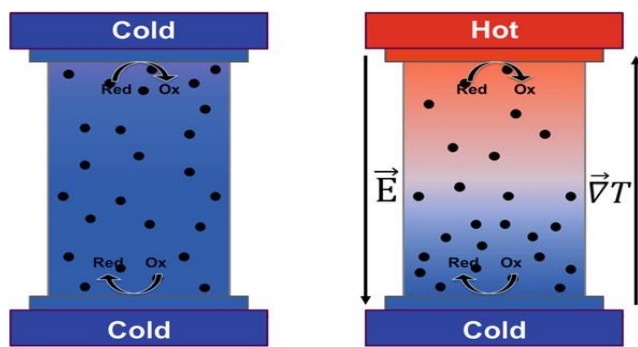
zníženie mriežkovej tepelnej vodivosti pri súčasnom zvýšení Seebeckovho koeficientu [2–4]. To viedlo k niektorým pozoruhodným zlepšeniam v schopnosti premeny tepelnej energie na elektrickú. Avšak ani tie "najslubnejšie" materiály zatiaľ nedokážu prekročiť minimálnu požiadavku ZT . Okrem toho tieto nanoštruktúrované TE materiály trpia prevádzkovými, environmentálnymi a ekonomickými prekážkami, ako sú ich obmedzené rozmery, značné výrobné náklady a prítomnosť vzácnych a toxických materiálov. Aby sa termoelektrická technológia stala ekologickou a ekonomicky životaschopnou, hľadajú sa alternatívne riešenia v nových typoch TE materiálov, ako sú polyméry [5], iónové vodiče [6,7].

Jednou z takýchto možností sú kvapalné elektrolyty. Uvádzané hodnoty Seebeckových koeficientov sú vo všeobecnosti rádoovo alebo viac väčšie ako u polovodičových náprotivkov (vrátane nanoštruktúr). Okrem toho sú vyrobené z prvkov, ktoré sú na Zemi rozšírené a nie sú toxické. Nanešťastie, elektrická vodivosť takýchto kvapalín je o niekoľko rádov menšia, a preto sa kvapalné elektrolyty donedávna považovali za neúčinné pre technológiu získavania odpadového tepla. Iónové kvapaliny a binárne zmesi iónových kvapalín a rozpúšťadiel však dávajú novú nádej vo vývoji kvapalinovej termoelektriky. Iónové kvapaliny (IK) sú roztavené soli, ktoré sú pri izbovej teplote kvapalné a zostávajú kvapalné až do teplôt oveľa vyšších ako 100 °C (niektoré môžu presiahnuť 300 °C). IK majú veľké hodnoty iónovej vodivosti a širšie elektrochemické okná v porovnaní s inými kvapalnými elektrolytmi [8,9], čo z nich robí sľubného kandidáta pre rôzne aplikácie na rekuperáciu odpadového tepla s nízkou spotrebou. V súčasnosti je najštudovanejšou Termoelektrickou vlastnosťou kvapalných elektrolytov termo-galvanický efekt, t. j. elektrochemické reakcie medzi molekulami redoxného páru a elektródami závislé od teploty. Najvyšší zaznamenaný Seebeckov koeficient sa zistil pri redoxnom páre na báze kobaltu zmiešanom v iónových kvapalinách väčší ako 2 mV/K v širokom rozsahu teplôt siahajúcom vysoko nad 100 °C. Zistilo sa tiež, že Seebeckov koeficient v kvapalných elektrolytoch sa zvyšuje pridaním koloidných magnetických nanočastíc (ferrofluidov) [10]. Tieto nanočastice sú "nábojovo" stabilizované a predpokladá sa, že ich termofúzia pod tepelným gradientom a adsorpcia elektródami ovplyvňujú termoelektrický potenciál kvapaliny.

II. ZÁKLADNÉ MECHANIZMY TERMOELEKTRICKEJ PREMENY

V pevných materiáloch je tvorba termoelektrického potenciálu dobre známa z nerovnovážnej termodynamiky tokov tepla a náboja (elektrónov alebo dier), vyjadrených Onsagerovými vzťahmi. V prípade kvapalných termoelektrických materiálov je situácia úplne odlišná. Po prvé, existuje viacero typov nosičov náboja, t. j. ióny elektrolytu a iné rozpustené látky, ako sú koloidné častice alebo makromolekuly. Všetky tieto nosiče sú náchylné na termodifúziu, ako aj na vzájomné interakcie a niektoré ióny elektrochemicky reagujú s elektródami, čo veľmi komplikuje interpretáciu experimentálnych údajov takýchto systémov [11,12]. Okrem toho sa kvapalná vzorka musí umiestniť do nádoby (nazývanej termočlánok), ktorá sa má skúmať, a preto sa musia prijať ďalšie opatrenia, aby sa minimalizovali experimentálne chyby spôsobené tepelnými a elektrickými stratami do okolia.

Termoelektrický modul obsahujúci takúto kvapalinu sa často označuje ako "termoelektrochemický článok", "tepelné nabitý superkondenzátor" alebo jednoducho "termoelektrický článok" v závislosti od toho, ktorý TE efekt dominuje v procese termoelektrickej premeny energie. Pozornosť je zameraná na termoelektrický článok obsahujúci iónové koloidné kvapaliny (napr. fero kvapaliny), v ktorom koexistujú dva zdroje termoelektrických javov, a to termogalvanický Seebeckov jav a vnútorný Seebeckov jav. Ako je zobrazené na obr.1, kvapalina (nie iónová kvapalina) sa považuje za spojité prostredie, v ktorom sú rozpustené nabitie (magnetické) častice, protiióny (pre elektrickú neutralitu roztoku) a molekuly redoxného páru. Oba konce článku sú hermeticky uzavreté rovnakými a kovovými elektródami. Keď sa aplikuje teplotný gradient (∇T), na týchto elektródach sa objaví elektrický potenciál (ΔV). Aby sa vyhnulo konvekcií, článok je ohrievaný zhora.



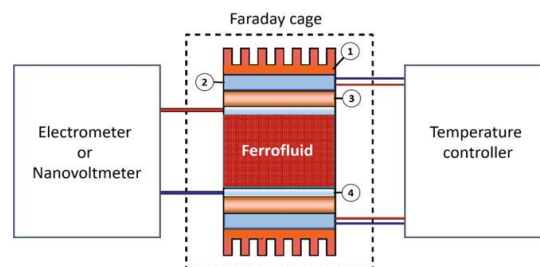
Obr. 1. Schematický pohľad na vzpriamené termočlánky v izotermickom stave (ľavý panel) a pri teplotnom gradiente ∇T (pravý panel). Pri pôsobení ∇T dochádza k termodifúzii iónových druhov a termogalvanickým reakciám redoxných druhov, ktoré prispievajú k celkovému Seebeckovmu potenciálu v bunke

Príprava iónových nanokvapalín z interagujúcich nanočastíc čelí sama o sebe obrovskej výzve. Najmä fero kvapaliny obsahujú voľne sa pohybujúce magnetické nanočastice, ktoré majú tendenciu vytvárať reťazce a agregáty prostredníctvom príťažlivých magnetických síl, pokiaľ nie sú vhodne tienené inými odpudivými silami (elektrostatickými, sterickými atď.), čo si vyžaduje jemné vyladenie povlakových iónov jednotlivých nanočastíc, ako aj okolitých iónových podmienok (napr. ióny elektrolytu, proti- a ko-ióny). Fero kvapaliny použité v príkladových štúdiách pozostávajú z nanočastíc maghemitu (γ -Fe₂O₃) s priemerným priemerom častíc v rozsahu 6 - 8 nm. Sú buď iónovo stabilizované [13–16], alebo s polymérmí a dispergované v polárnych kvapalinách (voda a organické rozpúšťadla).

Termoelektrické merania sa uskutočnili v podmienkach termogalvanického článku, t. j. vždy bolo prítomné malé množstvo molekúl redoxného páru.

Schematický obrázok termoelektrickej meracej bunky je uvedený na obr. 2. Na správne meranie "základnej" termoelektrickej vlastnosti kvapaliny je potrebné prijať nasledujúce opatrenia.

- Telo bunky: Tepelná vodivosť materiálu by mala byť menšia alebo porovnateľná s tepelnou vodivosťou kvapalnej vzorky. Materiál alebo konštrukcia musia byť schopné prispôsobiť sa dilatácii kvapaliny pri vysokej teplote. Materiál musí byť inertný (nemôže dochádzať k chemickým reakciám s kvapalinou) a nepriepustný.
 - Elektródy: Materiál musí byť elektrochemicky stabilný, mať vysokú tepelnú odolnosť a vodivosť (aby sa zabezpečil dobrý prenos tepla z ohrievača/chladiča do kvapaliny).
 - Faradayova klieťka, elektrometer: V prípade vysokoodporových vzoriek je žiaduce, aby bola bunka chránená pred EM vlnami z okolia a aby sa použili voltmetre s vysokou vstupnou impedanciou (10^{11} alebo vyššou).
 - Rozmery: Aby sa zabránilo zavedeniu konvekčných pohybov kvapaliny alebo nanočastíc, by sa mala bunka zahrievať zhora (obr. 1).
- V dôsledku termodifúzneho efektu, najmä magnetických nanočastíc, sa termoelektrické napätie (teda Seebeckov koeficient) nanokapalín vyvíja počas dlhého časového obdobia, od niekoľkých minút až po niekoľko dní, v závislosti od viskozity kvapaliny, geometrie bunky, hydrodynamickej veľkosti nanočastíc a ich koncentrácie. Takýto pomalý proces sa môže stať experimentálne ťažkopádny, avšak práve táto časová závislosť S_e nám poskytuje prostriedky na rozlíšenie rôznych termoelektrických javov prebiehajúcich vo vnútri zložitých, magnetických nanokvapalín [17].



Obr. 2 Schematické zobrazenie princípu termoelektrického merania použitého v experimentálnych štúdiách

III. ZÍSKAVANIE ENERGIE NA ZÁKLADE INTERAKCIE SĽNEČNÁ ENERGIA- TEPELNÁ ENERGIA

Ako prvá bude vykonaná analýza publikácie [18]. Článok skúma využitie hybridných nanokvapalín v systémoch na zber solárnej tepelnej energie. Tieto nanokvapaliny, kombinujúce viac typov nanočastíc, sú preskúmané vzhľadom na ich schopnosť zlepšiť efektívnosť solárnych kolektorov vďaka vynikajúcim optickým a termofyzikálnym vlastnostiam. Bolo použitých viacero metód na prípravu a testovanie hybridných nanokvapalín, vrátane dvojstupňovej metódy a metódy jedného kroku pre stabilnú disperziu nanočastíc v základnej kvapaline. Analyzované boli rozličné kombinácie materiálov, ako napríklad oxidy kovov a uhlíkové nanotrubičky, v rôznych koncentráciách a základných kvapalinách. Výsledky ukázali, že hybridné nanokvapaliny môžu výrazne zlepšiť termálnu výkonnosť solárnych kolektorov, často až o 100% v porovnaní so štandardnými kvapalinami. Boli identifikované kľúčové parametre ako veľkosť, typ a

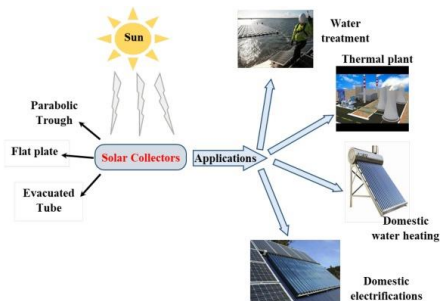
koncentrácia nanočastíc, ktoré ovplyvňujú viskozitu, tepelnú vodivosť a stabilitu nanokvapalín. Obrázok 3 podáva komplexný prehľad o tom, ako rôzne parametre ovplyvňujú vlastnosti a efektívnosť hybridných nanokvapalín používaných v solárnych tepelných energetických systémoch a aké sú dôležité optické a termofyzikálne vlastnosti, ktoré by mali byť zvážené pri ich výbere a dizajne.

Obr. 3 Komplexný prehľad faktorov ovplyvňujúcich vlastnosti a efektívnosť hybridných nanokvapalín [18].

Článok [19] sa zaoberá využitím nanokvapalín na zlepšenie



výkonnosti solárnych kolektorov a iných zariadení na zber solárnej energie. Skúma rôzne aspekty efektívnosti nanokvapalín, ako sú veľkosť a koncentrácia nanočastíc, ich tvary a rýchlosť toku nanokvapalín, a ako tieto parametre ovplyvňujú účinnosť zberu solárnej energie. Obsahuje prehľad súčasných pokrokov v oblasti nanokvapalín používaných v solárnych energetických zariadeniach. Detailne sa opisujú rôzne typy solárnych kolektorov a zariadení, ako sú parabolické prichodkové solárne kolektory, ploché solárne kolektory, priame absorpčné solárne kolektory a fotovoltaické termálne systémy, kde sa nanokvapaliny používajú na zvýšenie tepelnej účinnosti.



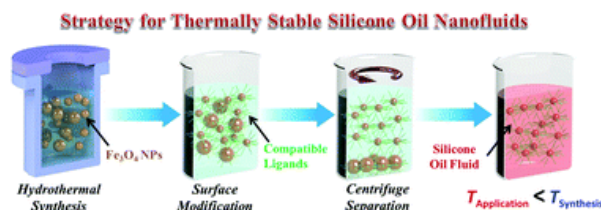
Nanokvapaliny výrazne zlepšujú výkonnosť solárnych kolektorov a iných zariadení na zber solárnej energie vďaka svojim výnimočným termofyzikálnym vlastnostiam, ako sú vysoká tepelná vodivosť a konvekčný koeficient prenosu tepla. Tieto vlastnosti umožňujú efektívnejší prenos a uchovávanie získanej solárnej energie. Použité boli častice ako TiO_2 , MWCNT, Al_2O_3 , ZnO, Fe_2O_3 , Ag, Cu, SiO_2 a iné, ktoré boli suspendované vo vode. Boli testované rôzne veľkosti častíc v rozsahu od 10 do 60 nanometrov. Pri niektorých experimentoch boli použité aj surfaktanty, ako je Triton X-100, pre zlepšenie výkonu nanokvapalín v solárnych aplikáciách. Dosiahlo sa zvýšenie účinnosti kolektora až o 35% pri použití TiO_2 a vody v porovnaní s čistou vodou.

Obr. 4 Typy kolektorov a ich aplikácie [19]

Pri použití Al_2O_3 nanokvapaliny sa zaznamenalo výrazné zlepšenie prenosu tepla v porovnaní so ZnO a Fe_2O_3 nanokvapalinami. V prípade Ag nanokvapaliny bol zaznamenaný vyšší zisk tepla kvôli zníženiu koeficientu straty tepla kolektora.

Publikácia [20] sa zaoberá vývojom stabilne dispergovaných nanokvapalín na báze silikónového oleja s nanočasticami Fe_3O_4 pre

priamy zber solárnej tepelnej energie. Experimenty preukázali, že nanokvapaliny udržiavajú stabilnú disperziu pri vysokých teplotách (nad $110\text{ }^\circ\text{C}$), čo umožňuje efektívny zber solárnej energie. Nanokvapaliny demonštrovali zvýšenú efektívnosť pri premenách solárnej energie na tepelnú energiu vďaka vysokému absorpčnému pomeru a tepelnej kapacite Fe_3O_4 nanočastíc. Výsledky naznačujú, že použitie týchto nanokvapalín môže značne zvýšiť účinnosť solárnych tepelných zberačov.



Obr. 5 Schéma prípravy tepelne stabilnej nanokvapaliny [20]

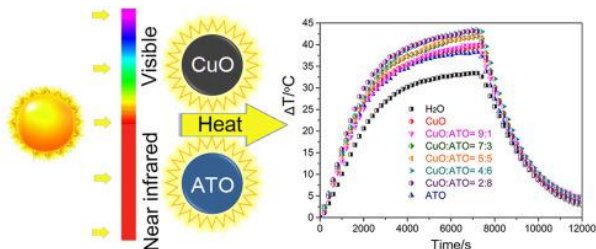
Prehľadová publikácia [21] sa zameriava na vývoj a charakteristiku nanokvapalín na báze iónových kvapalín a ich termálne správanie. Tieto nanokvapaliny, sa skladajú z nanočastíc v iónových kvapalinách a majú potenciál v aplikáciách súvisiacich s prenosom tepla a energetickým zberom, napríklad v solárnych elektrárnach. V článku boli preskúmané rôzne typy nanočastíc a iónových kvapalín, ktoré boli vybrané na základe ich schopnosti efektívne zlepšiť prenos tepla a tepelné vlastnosti. Medzi použité nanočastice patrili oxid hlinitý (Al_2O_3), ktorý je známy svojimi vynikajúcimi tepelnými vlastnosťami, oxid meďnatý (CuO), ktorý zlepšuje termálne vlastnosti iónových kvapalín, a nanodiamanty a uhlíkové nanotrúbice (CNTs), ktoré sú výnimočne svojimi termickými a mechanickými vlastnosťami. Pokiaľ ide o typy iónových kvapalín, boli skúmané imidazoliové iónové kvapaliny ako [HMIM][BF₄] a [C4mim][NTf₂], ktoré sú vhodné vďaka svojim nízkym bodom topenia a vynikajúcim rozpúšťadlovým vlastnostiam. Taktiež boli použité pyrrolidíniové a fosfóniové iónové kvapaliny, ktoré sú známe svojou dobrou elektrochemickou a termálnou stabilitou, čo ich robí vhodnými pre vysokoteplotné aplikácie. Tieto materiály boli vybrané pre ich potenciál v aplikáciách zahŕňajúcich solárne kolektory a systémy zberu a uchovávanie tepla. Zistilo sa, že nanokvapaliny majú potenciál výrazne zlepšiť prenos tepla vďaka vylepšeným termálnym vlastnostiam, ako sú tepelná vodivosť a kapacita. Napríklad, experimenty ukázali, že prídanie nanočastíc do iónových kvapalín môže zvýšiť tepelnú vodivosť a zlepšiť energetickú účinnosť v aplikáciách ako sú solárne kolektory.

Publikácia [22] sa zaoberá vývojom nanokvapalín obsahujúcich nanočastice oxidu meď (CuO) a antimonom dopovaného oxidu cínu (ATO) pre vylepšené vlastnosti solárnej tepelnej konverzie. Boli použité CuO a ATO nanočastice, ktoré boli dispergované vo vode po povrchovej úprave. Autori vyvinuli dvojzložkové nanofluidy, ktoré kombinujú vlastnosti týchto nanočastíc, aby dosiahli širokopásmovú absorpciu. Charakterizácia bola vykonaná pomocou rôznych analytických techník vrátane transmisnej elektrónovej mikroskopie (TEM), difrakcie röntgenových lúčov (XRD), a UV-VIS-NIR spektroskopie. Výskum odhalil, že dvojzložkové nanofluidy s CuO a ATO nanočasticami majú výrazne lepšie vlastnosti solárnej absorpcie a termálnej konverzie v porovnaní s jednozložkovými nanofluidmi. Tieto nanokvapaliny dosiahli solárne vážené absorpčné frakcie až 99.6% a

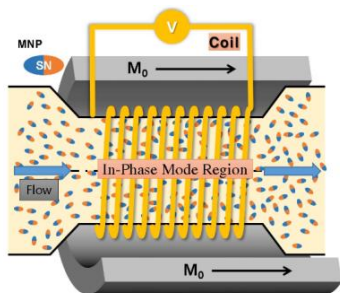
solárnu termálnu využiteľnosť až 92.5%, čo je výrazné zlepšenie oproti predchádzajúcim materiálom.

Obr. 6 Solárna tepelná konverzia nanokvapalín CuO-ATO [22]

Článok [23] sa zaoberá výrobou elektrickej energie pomocou magnetických nanokvapalín v mikrometrových kanáloch. Skúma



možnosti využitia magnetizácie magnetických nanočastíc (MNP) v nanokvapalinách na generovanie elektriny pri ich prechode cez cievku v elektromagnetickom poli. Výskum používal olejové alebo vodné nanokvapaliny obsahujúce magnetizované nanočastice, ktoré boli



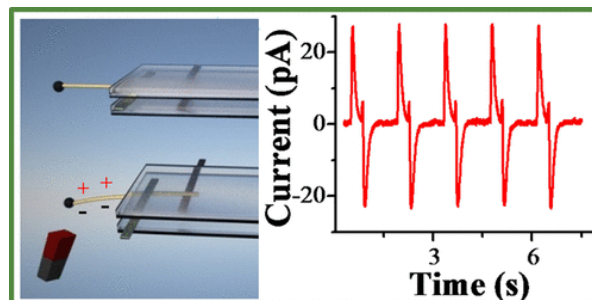
orientované v in-phase móde magnetizácie pomocou permanentného magnetu. Ako experimentálne modely boli použité silikónové a teflonové trubice, kde boli nanokvapaliny pumpované a magnetické orientácie MNPs boli usmerňované tak, aby sa maximalizovala indukovaná elektromotorická sila podľa Faradayovho zákona. Výsledky experimentov potvrdili, že orientácia MNPs v in-phase móde je kritická pre efektívnu generáciu elektrickej energie. Výstupné napätie a výkon boli merané a porovnané s numerickými výpočtami, čo ukázalo dobrú zhodu. Bolo zistené, že in-phase usporiadanie magnetických momentov MNPs umožňuje efektívne generovanie mikrovoltov pri rýchlostiach pohybu nanokvapaliny 0,1 m/s.

Obr. 7 Znárodnenie generovania elektrickej energie prúdením nanokvapaliny [23]

Publikácia [24] predstavuje novú technológiu na generovanie elektrickej energie pomocou kontaktných nanogenerátorov (CLNG), ktoré využívajú magnetickú silu na zberanie mechanickej energie bez priameho kontaktu s mechanickým zdrojom pohybu. Tieto zariadenia môžu využívať ZnO mikrodrôty alebo PZT nanodrôty. V článku sa používajú dva typy nanogenerátorov: jeden založený na ZnO mikrodrôtoch a druhý na PZT nanodrôtoch. V oboch prípadoch sú tieto drôty kombinované s magnetickými materiálmi, čo im umožňuje zberať energiu z meniacich sa magnetických polí. Na výrobu týchto zariadení boli použité metódy ako fotolitografia, magnetronové naprašovanie, elektrospinning a rôzne pokročilé metódy na vytváranie a spojovanie komponentov. Bolo zistené, že tieto nanogenerátory môžu generovať dostatočné množstvo elektriny na napájanie zariadení, ako sú napríklad

LCD displeje. Maximálne výstupné napätie a prúd týchto zariadení dosahujú hodnoty až 3,2 V a 50 nA. Okrem toho bola preukázaná ich schopnosť fungovať ako senzory v dôsledku ich schopnosti zaznamenávať zmeny v magnetickom poli.

Obr. 8 Znárodnenie generovania elektrickej energie pomocou kontaktných nanogenerátorov [24]



IV. ZÁVER

V posledných rokoch nastal značný pokrok v oblasti využitia nanotechnológií pre energetické aplikácie, či už v zlepšovaní solárnych kolektorov pomocou hybridných nanofluidov alebo vývoji nových typov nanogenerátorov ako bezkontaktný zberač energie. Táto publikácia poskytuje základný prehľad vybraných publikácií v tomto smere a zistené výskumy. Hybridné nanofluidy zvyšujú účinnosť solárnych systémov vďaka vylepšeným termálnym vlastnostiam, zatiaľ čo magneticky riadené nanogenerátory otvárajú cestu pre generovanie energie bez fyzického kontaktu s mechanickým zdrojom pohybu, čo je kľúčové pre aplikácie v náročných alebo citlivých prostrediach. Tieto pokroky nie lenže zvyšujú energetickú efektívnosť, ale tiež ponúkajú nové možnosti pre integráciu do self-powered senzorickej systémov a ďalších inteligentných technológií. Výzvou do budúcnosti zostáva ďalšie zvyšovanie výkonu, efektivity a dlhodobej stability týchto technológií, ako aj ich adaptácia a integrácia do komerčných aplikácií.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol na základe podpory projektu VEGA 2/0029/24.

LITERATÚRA

- [1] C.B. Vining, An inconvenient truth about thermoelectrics, *Nat Mater* 8 (2009) 83–85. <https://doi.org/10.1038/nmat2361>.
- [2] J.P. Heremans, M.S. Dresselhaus, L.E. Bell, D.T. Morelli, When thermoelectrics reached the nanoscale, *Nature Nanotech* 8 (2013) 471–473. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.129>.
- [3] V. Zinovyeva, S. Nakamae, M. Bonetti, M. Roger, Enhanced Thermoelectric Power in Ionic Liquids, *ChemElectroChem* 1 (2014) 426–430. <https://doi.org/10.1002/celec.201300074>.
- [4] L.D. Hicks, M.S. Dresselhaus, Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit, *Phys. Rev. B* 47 (1993) 12727–12731. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.47.12727>.
- [5] A. Fina, S. Colonna, L. Maddalena, M. Tortello, O. Monticelli, Facile and Low Environmental Impact Approach to Prepare Thermally Conductive Nanocomposites Based on Polylactide and Graphite Nanoplatelets, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 6 (2018) 14340–14347. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03013>.
- [6] A.I. Hochbaum, R. Chen, R.D. Delgado, W. Liang, E.C. Garnett, M. Najarian, A. Majumdar, P. Yang, Enhanced thermoelectric performance

- of rough silicon nanowires, *Nature* 451 (2008) 163–167. <https://doi.org/10.1038/nature06381>.
- [7] D. Zhao, H. Wang, Z.U. Khan, J.C. Chen, R. Gabrielsson, M.P. Jonsson, M. Berggren, X. Crispin, Ionic thermoelectric supercapacitors, *Energy Environ. Sci.* 9 (2016) 1450–1457. <https://doi.org/10.1039/C6EE00121A>.
- [8] Thermo-Electrochemical Cells for Harvesting Waste Heat, (n.d.). <https://encyclopedia.pub/entry/26475> (accessed May 10, 2024).
- [9] I. Burmistrov, R. Khanna, N. Gorshkov, N. Kiselev, D. Artyukhov, E. Boychenko, A. Yudin, Y. Konyukhov, M. Kravchenko, A. Gorokhovskiy, D. Kuznetsov, Advances in Thermo-Electrochemical (TEC) Cell Performances for Harvesting Low-Grade Heat Energy: A Review, *Sustainability* 14 (2022) 9483. <https://doi.org/10.3390/su14159483>.
- [10] T.J. Salez, B.T. Huang, M. Rietjens, M. Bonetti, C. Wiertel-Gasquet, M. Roger, C.L. Filomeno, E. Dubois, R. Perzynski, S. Nakamae, Can charged colloidal particles increase the thermoelectric energy conversion efficiency?, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 19 (2017) 9409–9416. <https://doi.org/10.1039/C7CP01023K>.
- [11] C. Goupil, W. Seifert, K. Zabrocki, E. Müller, G.J. Snyder, Thermodynamics of Thermoelectric Phenomena and Applications, *Entropy* 13 (2011) 1481–1517. <https://doi.org/10.3390/e13081481>.
- [12] S. Di Lecce, F. Bresme, Thermal Polarization of Water Influences the Thermoelectric Response of Aqueous Solutions, *J. Phys. Chem. B* 122 (2018) 1662–1668. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10960>.
- [13] B.T. Huang, M. Roger, M. Bonetti, T.J. Salez, C. Wiertel-Gasquet, E. Dubois, R. Cabreira Gomes, G. Demouchy, G. Mériguet, V. Peyre, M. Kouyaté, C.L. Filomeno, J. Depeyrot, F.A. Tourinho, R. Perzynski, S. Nakamae, Thermoelectricity and thermodiffusion in charged colloids, *J Chem Phys* 143 (2015) 054902. <https://doi.org/10.1063/1.4927665>.
- [14] T.J. Salez, S. Nakamae, R. Perzynski, G. Mériguet, A. Cebers, M. Roger, Thermoelectricity and Thermodiffusion in Magnetic Nanofluids: Entropic Analysis, *Entropy* 20 (2018) 405. <https://doi.org/10.3390/e20060405>.
- [15] F. Gazeau, E. Dubois, J.C. Bacri, F. Boué, A. Cebers, R. Perzynski, Anisotropy of the structure factor of magnetic fluids under a field probed by small-angle neutron scattering, *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* 65 (2002) 031403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.031403>.
- [16] E. Wandersman, E. Dubois, F. Cousin, V. Dupuis, G. Mériguet, R. Perzynski, A. Cebers, Relaxation of the field-induced structural anisotropy in a rotating magnetic fluid, *EPL* 86 (2009) 10005. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/86/10005>.
- [17] P.F. Salazar, S.T. Stephens, A.H. Kazim, J.M. Pringle, B.A. Cola, Enhanced thermo-electrochemical power using carbon nanotube additives in ionic liquid redox electrolytes, *J. Mater. Chem. A* 2 (2014) 20676–20682. <https://doi.org/10.1039/C4TA04749D>.
- [18] G. Hu, X. Ning, M. Hussain, U. Sajjad, M. Sultan, H.M. Ali, T.R. Shah, H. Ahmad, Potential evaluation of hybrid nanofluids for solar thermal energy harvesting: A review of recent advances, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 48 (2021) 101651. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101651>.
- [19] A.K. Hamzat, M.I. Omisanya, A.Z. Sahin, O. Ropo Oyetunji, N. Abolade Olaitan, Application of nanofluid in solar energy harvesting devices: A comprehensive review, *Energy Conversion and Management* 266 (2022) 115790. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115790>.
- [20] Y. Chen, X. Quan, Z. Wang, C. Lee, Z. Wang, P. Tao, C. Song, J. Wu, W. Shang, T. Deng, Stably dispersed high-temperature Fe₃O₄/silicone-oil nanofluids for direct solar thermal energy harvesting, *J. Mater. Chem. A* 4 (2016) 17503–17511. <https://doi.org/10.1039/C6TA07773K>.
- [21] A.A. Minea, S.M.S. Murshed, A review on development of ionic liquid based nanofluids and their heat transfer behavior, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91 (2018) 584–599. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.021>.
- [22] N. Chen, H. Ma, Y. Li, J. Cheng, C. Zhang, D. Wu, H. Zhu, Complementary optical absorption and enhanced solar thermal conversion of CuO-ATO nanofluids, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 162 (2017) 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.049>.
- [23] I.-H. Kim, J.-C. Lee, S. Lee, G.-Y. Jeong, S.-H. Lee, Power Generation Using Magnetic Nanofluids in Millimeter-Sized Channel With In-Phase Mode of Magnetization, *IEEE Transactions on Magnetics* 51 (2015) 1–4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2443917>.
- [24] N. Cui, W. Wu, Y. Zhao, S. Bai, L. Meng, Y. Qin, Z.L. Wang, Magnetic Force Driven Nanogenerators as a Noncontact Energy Harvester and Sensor, *Nano Lett.* 12 (2012) 3701–3705. <https://doi.org/10.1021/nl301490q>.

ADRESY AUTOROV

Ján Zbojovský, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, jan.zbojovsky@tuke.sk
 Ardian Hyseni, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, ardian.hyseni@tuke.sk