

## Studi Pengembangan Hibrida Nanofluida Untuk Aplikasi di Bidang Teknik

Ery Diniardi<sup>1</sup>, Hasan Basri<sup>2</sup>, Anwar Ilmar Ramadhan<sup>3,\*</sup>, Deni Almada<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27 Jakarta, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Otomotif dan Alat Berat, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27 Jakarta, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27 Jakarta, Indonesia

\*Email: [anwar.ilmar@umj.ac.id](mailto:anwar.ilmar@umj.ac.id)

Diterima: 15 Mei 2021

Direvisi: 17 Juni 2021

Disetujui: 19 Juli 2021

### ABSTRAK

Penelitian tentang nanofluida telah meningkat sangat pesat selama dekade terakhir. Meskipun beberapa inkonsistensi dalam hasil yang dilaporkan dan pemahaman yang tidak memadai tentang mekanisme panas dalam nanofluida, telah muncul sebagai fluida perpindahan panas yang menjanjikan. Dalam lanjutan dari penelitian nanofluida, para peneliti juga telah mencoba menggunakan nanofluida hibrida baru-baru ini, yang direkayasa dengan menanggukkan nanopartikel yang berbeda baik dalam bentuk campuran atau komposit. Ide menggunakan hybrid nanofluida adalah untuk lebih meningkatkan perpindahan panas dan karakteristik penurunan tekanan dengan trade-off antara kelebihan dan kekurangan suspensi individu, dikaitkan dengan rasio aspek yang baik, lebih baik jaringan termal dan efek sinergis nanomaterials. Ulasan ini merangkum penelitian terbaru tentang sintesis, sifat termofisika, perpindahan panas dan karakteristik penurunan tekanan, kemungkinan aplikasi dan tantangan nanofluida hibrida. Ulasan menunjukkan bahwa hibridisasi yang tepat dapat membuat nanofluida hibrida sangat menjanjikan untuk peningkatan perpindahan panas, namun, banyak penelitian masih dilakukan diperlukan dalam bidang preparasi dan stabilitas, karakterisasi dan aplikasi untuk mengatasi tantangan.

**Kata kunci:** Hibrida nanofluida, komposit, nanopartikel, termofisika.

### ABSTRACT

*Research on nanofluides has increased tremendously over the last decade. Despite some inconsistencies in the reported results and an inadequate understanding of the heat mechanism in nanofluids, it has emerged as a promising heat transfer fluid. In an extension of nanofluid research, researchers have also tried to use hybrid nanofluides recently, which are engineered by suspending different nanoparticles either in mixed or composite form. The idea of using hybrid nanofluids is to further improve heat transfer and pressure reduction characteristics with a trade-off between the advantages and disadvantages of individual suspensions, associated with good aspect ratios, better thermal networks and synergistic effects of nanomaterials. This review summarizes the latest research on synthesis, thermophysical properties, heat transfer and pressure reduction characteristics, possible applications and challenges of hybrid nanofluids. Reviews indicate that proper hybridization can make hybrid nanofluids very promising for improved heat transfer, however, much research is still needed in the fields of preparation and stability, characterization and application to overcome the challenges.*

**Keywords:** Hybrid nanofluides, composites, nanoparticles, thermophysics.

## PENDAHULUAN

Nanofluida, yang diciptakan oleh Choi [1], direkayasa koloid terdiri dari cairan dasar dan nanopartikel. Nanopartikel memiliki konduktivitas termal, biasanya orde besarnya lebih tinggi daripada cairan dasar dan dengan ukuran yang jauh lebih kecil dari 100 nm. Pengenalan nanopartikel meningkatkan kinerja perpindahan panas dari cairan dasar secara signifikan. Cairan dasar dapat berupa air, cairan organik (misalnya etilen, trietilen-glikol, refrigeran, dll.), minyak dan pelumas, bio-fluida, larutan polimer, dan cairan umum lainnya. Bahan nanopartikel termasuk logam yang stabil secara kimia (misalnya emas, tembaga), oksida logam (misalnya alumina, silika, zirkonia, titania), keramik oksida (misalnya  $Al_2O_3$ ,  $CuO$ ), karbida logam (misalnya  $SiC$ ), logam nitrida (misalnya  $AlN$ ,  $SiN$ ), karbon dalam berbagai bentuk (misalnya berlian, grafit, karbon nanotube, fullerene) dan nanopartikel yang difungsikan [2].

Sebagian besar pekerjaan penelitian difokuskan terutama pada nanofluida berbasis air dan etilen glikol [3-5], sangat sedikit laporan sintesis nanofluida berbasis minyak telah ditemukan [6]. Xuan dan Li [7] menemukan bahwa nanofluida berbasis minyak menunjukkan peningkatan karakteristik perpindahan panas yang lebih baik dibandingkan dengan nanofluida berbasis air, dan bahwa viskositas minyak dapat menjadi penting untuk dispersi dan stabilitas nanofluida [8]. Hwang dkk. [9] juga telah menunjukkan kesimpulan serupa bahwa peningkatan konduktivitas termal yang lebih tinggi dapat diperoleh jika cairan dasar konduktivitas termal yang lebih rendah digunakan. Oleh karena itu, nanofluida berbasis minyak yang mengandung karbon nanotube,  $TiO_2$ ,  $CuO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $AlN$  dan  $SiO_2$ , untuk aplikasi industri dan teknik, telah menarik lebih banyak perhatian dalam beberapa tahun terakhir [10-12].

Tujuan utama mensintesis nanofluida hibrida adalah untuk mendapatkan sifat-sifat bahan penyusunnya. Bahan tunggal tidak memiliki semua karakteristik yang menguntungkan yang diperlukan untuk tujuan tertentu; itu mungkin memiliki sifat termal yang baik atau sifat reologi. Tetapi dalam banyak aplikasi praktis, itu adalah diperlukan untuk trade-off antara beberapa properti dan di sanalah penggunaan nanofluida hibrida datang.

Selanjutnya, hibridanano fluida diharapkan menghasilkan konduktivitas termal yang lebih baik dibandingkan dengan nanofluida individu karena efek sinergis. Karbon nanotube memiliki banyak sifat unik seperti fisiknya kekuatan, stabilitas kimia, ketahanan mekanik, sangat tinggi konduktivitas listrik dan termal, dll [66]. Karakteristik ini telah menarik para peneliti terhadap nanotube karbon juga seperti dalam pengembangan kategori baru bahan nano hibrida terdiri dari komposit nanotube karbon dengan nanopartikel logam, semikonduktif atau non-konduktif. Untuk yang terbaik dari pengetahuan penulis, belum ada ulasan tentang nanofluida hibrida dilakukan sampai sekarang.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan gambaran tentang sintesis dan karakterisasi nanofluida hibrida serta penelitian kondisi kerja sampai saat ini melibatkan penggunaan nanofluida hibrida. Dalam makalah tersebut, sifat sintetis, sifat termofisika, perpindahan panas dan pengurangan tekanan dari nanofluida hibrida yang berbeda sesuai dengan pekerjaan eksperimental dan numerik yang dilakukan oleh peneliti yang berbeda ditinjau. Akhirnya, kemungkinan aplikasi dan tantangan dibahas.

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam artikel ilmiah ini adalah dengan menggunakan studi pustaka dari beberapa artikel ilmiah hasil penelitian dan beberapa paper review pada database Google Scholar dan juga Scencedirect.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Sintesis dari hibrida nanofluida

Mungkin ada beberapa metode [61,62] untuk mensintesis hibrida nanofluida dan metode persiapan yang dilaporkan dalam literature diringkas dalam Tabel 1. Seperti yang ditunjukkan, sebagian besar metode dua langkah telah digunakan daripada metode satu langkah. Di sini, metode persiapan nanofluida hibrida untuk tiga cairan dasar dibahas secara rinci.

**Tabel 1.** Metode sintesis dari hibrida nanofluida [9]

Methods, process type	Base fluids	Materials
One-step method, chemical	Transformer oil	Silver/silica
One-step method, thermal	Water	Silver/CNT
two-step method, mechanical	Water	CNT, AuNP, CuNP
Two-step method, mechanical	Water	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PCM
Two-step method, mechanical	Water	Cu/Cu <sub>2</sub> O
Two-step method, mechanical	EG	Al <sub>95</sub> Zn <sub>05</sub>
Two-step method, mechanical	Water	CNT/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Two-step method, mechanical	Water	Silver/TiO <sub>2</sub>
Two-step method, chemical	poly-alpha-olefin	Sphere/CNT
Two-step method, chemical	Water	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cu
Two-step method, chemical	Water	Silica/CNT
Two-step method, chemical	Water	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CNT
Two-step method, chemical	Water, EG	Silver, CNT, CuO, HEG
Two-step method, chemical	Water	Cu/TiO <sub>2</sub>
Two-step method, chemical	Water	CNT/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Two-step method, chemical	Water	Diamond/nickel

### Nanofluida berbasis minyak

Han dkk. [67] menyiapkan partikel hybrid sphere/CNT terlebih dahulu mempersiapkan nanopartikel bola melalui pirolisis semprot, diikuti oleh pertumbuhan katalitik CNT. Sintesis melibatkan pembuatan larutan prekursor berair Fe (NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> dan Al (NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>. NS nanopartikel komposit bimetal dari besi dan aluminium adalah terbentuk dari dekomposisi termal tetesan aerosol yang dihasilkan oleh nebulizer dalam gas pembawa nitrogen. Aerosol bimetalik ini partikel melewati pengering silika-gel untuk menghilangkan air dan kemudian dicampur dengan gas hidrogen di pintu masuk tungku tabung untuk konversi pirolitik dari logam nitrat menjadi kristal oksida nanopartikel. Nanopartikel oksida bulat diperkenalkan ke dalam tungku tabung untuk reaksi dengan asetilena dan hidrogen, yang mengarah pada pertumbuhan CNT di permukaannya. Hibrida partikel bola / CNT dikumpulkan pada filter membran dan terdispersi dalam minyak.

### Nanofluida berbasis air

Jana dkk. [68] menambahkan CNT dalam fraksi volume yang berbeda untuk air untuk menghasilkan suspensi CNT. AuNP (nanopartikel emas) koloid ditambahkan ke air deionisasi untuk menghasilkan suspensi AuNP. Suspensi AuNP ditambahkan ke berbagai jenis

CNT suspensi yang memiliki fraksi volume CNT yang berbeda untuk dicapai CNT – suspensi AuNP. Dalam suspensi CuNP (nanopartikel tembaga), bahan-bahannya adalah CuNPs, garam laurat dan deionisasi air. Garam laurat ditambahkan untuk stabilitas CuNPs dalam suspensi. Bransonic Ultrasonic Cleaner digunakan sebagai sonikasi berdaya rendah untuk membubarkan nanopartikel ke dalam air. Penambahan CNT ke dalam Nanofluida CuNP mengurangi sedimentasi CuNP.

Chen dkk. [85] menyiapkan nanofluida hibrida dengan mendispersikan Nanopartikel MWCNT dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam air. Batmunkh dkk. [86] menyiapkan nanokomposit Ag dan TiO<sub>2</sub> dengan ball milling dan kemudian terdispersi dalam air suling untuk menghasilkan nanofluida. Madhes dkk. [87] juga telah menggunakan metode dua langkah untuk sintesis. Sundar dkk. [88,89] menggunakan metode in-situ untuk nanopartikel komposit sediaan dan terdispersi dalam air.

### Nanofluida berbasis etilen glikol

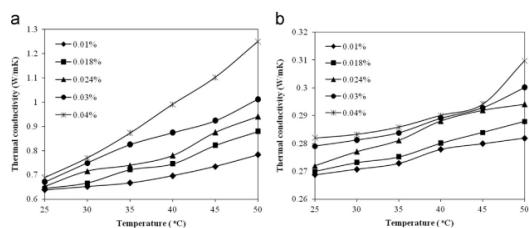
Dalam penelitian yang dilakukan oleh Paul et al. [90], nanopartikel Al – Zn adalah disintesis dengan paduan mekanik. Mereka telah mengambil elemen bubuk aluminium (95%) dan seng (5%) dan dicampur dengan paduan mekanis pada suhu kamar menggunakan energi tinggi pabrik bola planet. Mereka telah menggiling campuran bubuk untuk periode waktu yang diinginkan untuk mencapai keadaan tunak (ketika komposisi campuran bubuk menjadi seragam). Akhirnya mereka menyiapkan nanofluida hibrida dengan proses dua langkah dengan menambahkan nanopartikel Al – Zn ultra-halus dalam jumlah yang sesuai dengan etilena glycol (cairan dasar) dan menundukkan campuran yang dihasilkan untuk getaran ultrasonik diikuti dengan pengadukan magnetik.

Bayi dan Ramaprabhu [78–80], Bayi dan Ramaprabhu [81], Aravind dan Ramaprabhu [84] dan Sundar dkk [89] digunakan serupa metode dua langkah untuk air untuk menyiapkan hibrida berbasis EG-nanofluida.

### Sifat termofisika dari hibrida nanofluida

Menurut penyelidikan yang dilakukan oleh Aravind dan Ramaprabhu [83],

konduktivitas termal nanofluida GC diukur menggunakan Termometer KD2 Pro dan digambarkan sebagai fungsi suhu dan fraksi volume dalam air DI dan EG. Sebuah peningkatan dalam konduktivitas termal 11,3% dan 97,5% telah dicapai untuk a fraksi volume sangat rendah 0,04% dalam nanofluida GC berbasis air DI pada 25 1C dan 50 1C, masing-masing (Gambar. 1 (a)). nanofluida berbasis EG, menunjukkan peningkatan konduktivitas termal 13,7% dan 24% pada konsentrasi volume 0,04% nanopartikel pada 25 1C dan 50 1C, masing-masing (Gambar. 1 (b)).



Gambar 1. Konduktivitas termal GC dalam (a) air DI dan (b) cairan dasar EG [17]

### Aplikasi dan tantangan aplikasi hibrida nanofluida

Penelitian substansial terkait dengan berbagai aplikasi nanofluida telah dilakukan dalam dekade terakhir dan jumlah tinjauan artikel juga telah diterbitkan baru-baru ini meliputi perumahan, komersial, aplikasi industri, dan transportasi. Area aplikasi adalah sangat bervariasi seperti pendinginan elektronik, pendinginan mesin/kendaraan manajemen termal, pendinginan generator, pendingin dalam permesinan, pengelasan, pendinginan sistem nuklir, pelumasan, penyimpanan termal, pemanas matahari, pendinginan dan pemanasan di gedung-gedung, pendingin transformator, biomedis, obat-obatan reduksi, pipa panas, pendinginan, ruang, pertahanan, dan kapal [3.12.21.32.33.42.52.54.555.59]. Nanofluida hibrida cukup jenis baru nanofluida dan mereka masih dalam penelitian dan tahap pengembangan sejauh aplikasi mereka di industri adalah khawatir. Diharapkan untuk menggunakan nanofluida hibrida juga untuk hal serupa aplikasi dengan kinerja yang lebih baik. Namun, penelitian berorientasi aplikasi dari nanofluida hibrida terbatas pada sangat sedikit aplikasi [70,87]. Dapat dicatat bahwa kepadatan efektif, kapasitas panas dan

viskositas nanofluida hibrida akan terletak di antara sama untuk mono nanofluida, sedangkan konduktivitas termal hybrid nanofluida mungkin jauh lebih tinggi dibandingkan dengan yang mono karena efek sinergis. Meskipun, studi yang berkaitan dengan heat sink [88] dan panas pipa [70] mengungkapkan bahwa dampak menggunakan nanofluida hibrida tidak sangat baik dibandingkan dengan nanofluida mono mungkin karena tidak adanya efek sinergis. Baghbanzadeh dkk. [73.105] dikembangkan berbentuk bola silika/MWCNTs hibrida nanofluida untuk digunakan sebagai cairan pengeboran. Madhesh dkk. [87] menggunakan nanofluida hibrida tembaga – titania untuk tabung di dalam tabung jenis penukar panas aliran berlawanan. Penggunaan nanofluida hibrida juga memiliki telah diusulkan untuk pembangkit listrik mikro [106] dan untuk panas matahari kolektor [107]. Sebagai peningkatan perpindahan panas yang signifikan (hingga 570%) telah diamati untuk hibrida berbasis nanopartikel komposit nanofluids [78-84], peningkatan kinerja yang sangat baik dapat diharapkan untuk berbagai aplikasi.

### KESIMPULAN

Nanofluida hibrida adalah kelompok nanofluida yang cukup baru di yang lebih banyak pekerjaan penelitian perlu dilakukan sebelum mereka aplikasi praktis di industri. Kemungkinan aplikasi mereka bisa di hampir semua bidang aplikasi perpindahan panas, karena dari efek sinergis yang melaluinya mereka memberikan keuntungan sifat dari semua unsurnya. Telah ditemukan bahwa peningkatan konduktivitas termal nanofluida adalah salah satu pendorongnya faktor untuk meningkatkan kinerja dalam aplikasi yang berbeda. Penekanan sebagian besar studi tentang nanofluida hibrida hanya pada konduktivitas termal; dan sifat termofisika lainnya memiliki telah diabaikan. Jadi, studi yang lebih rinci untuk menguji stabilitas dan sifat termofisika lain dari nanofluida hibrida, akan menjadi diperlukan untuk meyakinkan kegunaannya dalam aplikasi praktis. Tinjauan saat ini mengungkapkan bahwa nanofluida hibrida yang mengandung nanopartikel komposit menghasilkan peningkatan konduktivitas termal yang signifikan serta

koefisien perpindahan panas. Namun, stabilitas jangka panjang, proses produksi, pemilihan yang sesuai kombinasi nanomaterial untuk mendapatkan efek sinergis dan biaya nanofluida mungkin menjadi tantangan utama di balik aplikasi praktis dan penelitian substansial masih diperlukan untuk mengidentifikasi dan mengatasi banyak tantangan untuk aplikasi yang berbeda.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM), Universitas Muhammadiyah Jakarta dan Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi yang telah mendukung dan memberikan hibah Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT) tahun 2021 dengan Nomor Kontrak: 163/E4.1/AK.04.PT/2021.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Choi SUS. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, developments and applications of non-newtonian flows, FED-Vol. 231/MDVol. 66, ASME, New York, p. 99–105.
- [2] Sarkar J. A critical review of heat transfer correlations of nanofluids. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:3271–7.
- [3] Yu W, Xie H. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *J Nanomater* 2012;2012:435873.
- [4] Murshed SMS, Leong KC, Yang C. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. *Int J Therm Sci* 2008;47(5):560–8.
- [5] Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ. Anomalous increase in thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Appl Phys Lett* 2001;78(6):718–20.
- [6] Choi C, Yoo HS, Oh JM. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants. *Curr Appl Phys* 2008;8:710–2.
- [7] Xuan Y, Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. *Int J Heat Fluid Flow* 2000;21:58–64.
- [8] Botha SS, Ndungu P, Bladergroen BJ. Physicochemical properties of oil-based nanofluids containing hybrid structures of silver nanoparticles supported on silica. *Ind Eng Chem Res* 2011;50:3071–7.
- [9] Hwang Y, Lee JK, Lee CH, Jung YM, Cheong SI, Lee CG, et al. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids. *Thermochim Acta* 2007;455(1-2):70–4.
- [10] Murshed SMS, Tan SH, Nguyen NT. Temperature dependence of interfacial properties and viscosity of nanofluids for droplet-based microfluidics. *J PhysD: Appl Phys* 2008;41(8):085502.
- [11] Chen L, Xie H. Silicon oil based multiwalled carbon nanotubes nanofluid with optimized thermal conductivity enhancement. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Asp* 2009;352(1–3):136–40.
- [12] Wong KV, Leon OD. Applications of nanofluids: current and future. *Adv Mech Eng* 2010;2010:519659.
- [13] Das SK, Choi SUS, Patel HE. Heat transfer in nanofluids – a review. *Heat Transf Eng* 2006;27(10):3–19.
- [14] Wang XQ, Mujumdar AS. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *Int J Therm Sci* 2007;46:1–19.
- [15] Daungthongsuk W, Wongwises S. A critical review of convective heat transfer of nanofluids. *Renew Sustain Energy Rev* 2007;11:797–817.
- [16] Trisaksria V, Wongwises S. Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids. *Renew Sustain Energy Rev* 2007;11(3):512–23.
- [17] Wang XQ, Mujumdar AS. A review of nanofluids – part I: theoretical and numerical investigations. *Braz J of Chem Eng* 2008;25(4):613–30.
- [18] Wang XQ, Mujumdar AS. A review of nanofluids – part II: experiments and applications. *Braz J Chem Eng* 2008;25(4):631–48.
- [19] Murshed SMS, Leong KC, Yang C. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – a critical review. *Appl Therm Eng* 2008;28: 2109–25.

- [20] Yu W, France DM, Routbort JL. Choi SUS. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements. *Heat Transf Eng* 2008;29(5):432–60.
- [21] Wen D, Lin G, Vafaei S, Zhang K. Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology* 2009;7(2):141–50.
- [22] Kakac S, Pramuanjaroenkij A. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *Int J Heat Mass Transf* 2009;52:3187–96.
- [23] Taylor RA, Phelan PE. Pool boiling of nanofluids: comprehensive review of existing data and limited new data. *Int J Heat Mass Transf* 2009;52:5339–47.
- [24] Chandrasekar M, Suresh S. A review on the mechanisms of heat transport in nanofluids. *Heat Transf Eng* 2009;30(14):1136–50.
- [25] Özeriç S, Kakaç S, Yazicioğlu AG. Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review. *Microfluid Nanofluid* 2010;8 (2):145–70.
- [26] Paul G, Chopkar M, Manna I, Das PK. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14 (7):1913–24.
- [27] Terekhov VI, Kalinina SV, Lemanov VV. The mechanism of heat transfer in nanofluids: State of the art (review). Part 1. Synthesis and properties of nanofluids. *Thermophys Aeromech* 2010;17(1):1–14.
- [28] Terekhov VI, Kalinina SV, Lemanov VV. The mechanism of heat transfer in nanofluids: state of the art (review). Part 2. Convective heat transfer. *Thermophys Aeromech* 2010;17(1):157–71.
- [29] Barber J, Brutin D, Tadrist L. A review on boiling heat transfer enhancement with nanofluids. *Nanoscale Res Lett* 2011;6(1):280.
- [30] Fan J, Wang L. Review of heat conduction in nanofluids. *J Heat Transf* 2011;133(4) (Article No. 040801).
- [31] Murshed SMS, Castro CAN, Lourenc MJV, Lopes MLM, Santos FJV. A review of boiling and convective heat transfer with nanofluids. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:2342–54.
- [32] Saidur R, Leong KY, Mohammad HA. A review on applications and challenges of nanofluids. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:1646–68.
- [33] Mohammed HA, Bhaskaran G, Shuaib NH, Saidur R. Heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels heat exchanger using nanofluids: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15(3):1502–12.
- [34] Xie H, Chen L. Review on the preparation and thermal performances of carbon nanotube contained nanofluids. *J Chem Eng Data* 2011;56 (4):1030–41.
- [35] Mohammed HA, Al-Aswadi AA, Shuaib NH, Saidur R. Convective heat transfer and fluid flow study over a step using nanofluids: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15(6):2921–39.
- [36] Sergis A, Hardalupas Y. Anomalous heat transfer modes of nanofluids: a review based on statistical analysis. *Nanoscale Res Lett* 2011;6:391.
- [37] Thomas S, Sobhan CBP. A review of experimental investigations on thermal phenomena in nanofluids. *Nanoscale Res Lett* 2011;6:377.
- [38] J. Sarkar et al. / *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015) 164–177 175 [38] Kim H. Enhancement of critical heat flux in nucleate boiling of nanofluids: a state-of-art review. *Nanoscale Res Lett* 2011;6:415.
- [39] Ghadimi A, Saidur R, Metselaar HSC. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. *Int J Heat Mass Transf* 2011;54(17–18):4051–68.
- [40] Ramesh G, Prabhu NK. Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment. *Nanoscale Res Lett* 2011;6:334.
- [41] Haddad Z, Oztop HF, Nada EA, Mataoui A. A review on natural convective heat transfer of nanofluids. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:5363–78.
- [42] Huminić G, Huminić A. Application of nanofluids in heat exchangers: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:5625–38.
- [43] Ahmed HE, Mohammed HA, Yusoff MZ. An overview on heat transfer

- augmentation using vortex generators and nanofluids: approaches and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:5951–93.
- [44] Vajjha RS, Das DK. A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power. *Int J Heat Mass Transf* 2012;55:4063–78.
- [45] Philip J, Shima PD. Thermal properties of nanofluids. *Adv Colloid Interface Sci* 2012;183–184:30–45.
- [46] Ahn HS, Kim MH. A review on critical heat flux enhancement with nanofluids and surface modification. *J Heat Transf* 2012;134(2):024001.
- [47] Abouali O, Ahmadi G. Computer simulations of natural convection of single phase nanofluids in simple enclosures: a critical review. *Appl Therm Eng* 2012;36:1–13.
- [48] Chandrasekar M, Suresh S, Senthilkumar T. Mechanisms proposed through experimental investigations on thermophysical properties and forced convective heat transfer characteristics of various nanofluids – a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16(6):3917–38.
- [49] Yu W, France DM, Timofeeva EV, Singh D, Routbort JL. Comparative review of turbulent heat transfer of nanofluids. *Int J Heat Mass Transf* 2012;55(21–22):5380–96.
- [50] Taylor R, Coulombe S, Otanicar T, Phelan P, Gunawan A, Lv W, et al. Small particles, big impacts: a review of the diverse applications of nanofluids. *J Appl Phys* 2013;113(1):011301.
- [51] Michaelides EE. Transport properties of nanofluids – a critical review. *J NonEquilib Thermodyn* 2013;38(1):1–79.
- [52] Sureshkumar R, Mohideen ST, Nethaji N. Heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;20:397–410.
- [53] Nkurikiyimfura I, Wang Y, Pan Z. Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids – A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;21:548–61.
- [54] Mahian O, Kianifar A, Kalogirou SA, Pop I, Wongwises S. A review of the applications of nanofluids in solar energy. *Int J Heat Mass Transf* 2013;57:582–94.
- [55] Cheng L, Liu L. Review boiling and two-phase flow phenomena of refrigerant-based nanofluids: fundamentals, applications and challenges. *Int J Refrig* 2013;36:421–46.
- [56] Sundar LS, Sharma KV, Naik MT, Singh MK. Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;25:670–86.
- [57] Sundar LS, Singh MK. Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;20:23–35.
- [58] Wu JM, Zhao J. A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement – research gap to engineering application. *Prog Nucl Energy* 2013;66:13–24.
- [59] Javadi FS, Saidur R, Kamalisarvestani M. Investigating performance improvement of solar collectors by using nanofluids. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;28:232–45.
- [60] Hussein AM, Sharma KV, Bakar RA, Kadrigama K. A review of forced convection heat transfer enhancement and hydrodynamic characteristics of a nanofluid. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;29:734–43.
- [61] Haddad Z, Abid C, Oztop HF, Mataoui A. A review on how the researchers prepare their nanofluids. *Int J Therm Sci* 2014;76:168–89.
- [62] Sidik NAC, Mohammed HA, Alawi OA, Samion S. A review on preparation methods and challenges of nanofluids. *Int Commun Heat Mass Transf* 2014;54:115–25.
- [63] Alawi OA, Sidik NAC, Mohammed HA, Syahrullail S. Fluid flow and heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: a review. *Int Commun Heat Mass Transf* 2014;56:50–62.
- [64] Shahrul IM, Mahbulul IM, Khaleduzzaman SS, Saidur R, Sabri MFM. A comparative review on the

- specific heat of nanofluids for energy perspective. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;38:88–98.
- [65] Li H, Ha CS, Kim I. Fabrication of carbon nanotube/SiO<sub>2</sub> and carbon nanotube/SiO<sub>2</sub>/Ag nanoparticles hybrids by using plasma treatment. *Nanoscale Res Lett* 2009;4:1384–8.
- [66] Guo S, Dong S, Wang E. Gold/platinum hybrid nanoparticles supported on multiwalled carbon nanotube/silica coaxial nanocables: preparation and application as electrocatalysts for oxygen reduction. *J Phys Chem C* 2008;112:2389–93.
- [67] Han ZH, Yang B, Kim SH, Zachariah MR. Application of hybrid sphere/carbon nanotube particles in nanofluids. *Nanotechnology* 2007;18:105701.
- [68] Jana S, Khojin AS, Zhong WH. Enhancement of fluid thermal conductivity by the addition of single and hybrid nano-additives. *Thermochim Acta* 2007;462:45–55.
- [69] Ho CJ, Huang JB, Tsai PS, Yang YM. Preparation and properties of hybrid waterbased suspension of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles and MEPCM particles as functional forced convection fluid. *Int Commun Heat Mass Transf* 2010;37:490–4.
- [70] Ho CJ, Huang JB, Tsai PS, Yang YM. On laminar convective cooling performance of hybrid water-based suspensions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles and MEPCM particles in a circular tube. *Int J Heat Mass Transf* 2011;54:2397–407.
- [71] Suresh S, Venkataraj KP, Selvakumar P, Chandrasekar M. Synthesis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Asp* 2011;388:41–8.
- [72] Suresh S, Venkataraj KP, Selvakumar P. Synthesis, characterisation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Cu nanocomposite powder and water based nanofluids. *Adv Mater Res* 2011;328–330:1560–7.
- [73] Baghbanzadeha M, Rashidib A, Rashtchiana D, Lotfib R, Amrollahib A. Synthesis of spherical silica/multiwall carbon nanotubes hybrid nanostructures and investigation of thermal conductivity of related nanofluids. *Thermochim Acta* 2012;549:87–94.
- [74] Abbasi SM, Nemati A, Rashidi A, Arzani K. The effect of functionalisation method on the stability and the thermal conductivity of nanofluid hybrids of carbon nanotubes/gamma alumina. *Ceram Int* 2013;39(4):3885–91.
- [75] Nine MJ, Batmunkh M, Kim JH, Chung HS, Jeong HM. Investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MWCNTs hybrid dispersion in water and their thermal characterization. *J Nanosci Nanotechnol* 2012;12:4553–9.
- [76] Munkhbayar B, Tanshen MR, Jeoun J, Chung H, Jeong H. Surfactant-free dispersion of silver nanoparticles into MWCNT-aqueous nanofluids prepared by one-step technique and their thermal characteristics. *Ceram Int* 2013;39(6):6415–25.
- [77] Nine MJ, Munkhbayar B, Rahman MS, Chung H, Jeong H. Highly productive synthesis process of well dispersed Cu<sub>2</sub>O and Cu/Cu<sub>2</sub>O nanoparticles and its thermal characterization. *Mater Chem Phys* 2013;141:636–42.
- [78] Baby TT, Ramaprabhu S. Synthesis and nanofluid application of silver nanoparticles decorated graphene. *J Mater Chem* 2011;21:9702–9.
- [79] Baby TT, Ramaprabhu S. Experimental investigation of the thermal transport properties of a carbon nanohybrid dispersed nanofluid. *Nanoscale* 2011;3:2208–14.
- [80] Baby TT, Ramaprabhu S. Synthesis of silver nanoparticle decorated multiwalled carbon nanotubes–graphene mixture and its heat transfer studies in nanofluid. *AIP Adv* 2013;3:012111.
- [81] Baby TT, Ramaprabhu S. Synthesis and transport properties of metal oxide decorated graphene dispersed nanofluids. *J Phys Chem C* 2011;115:8527–33.
- [82] Chen L, Yu W, Xie H. Enhanced thermal conductivity of nanofluids containing Ag/MWNT composites. *Powder Technol* 2012;231:18–20.
- [83] Aravind SSJ, Ramaprabhu S. Graphene wrapped multiwalled carbon nanotubes dispersed nanofluids for heat transfer applications. *J Appl Phys* 2012;112:124304.



- [84] Aravind SSJ, Ramaprabhu S. Graphene–multiwalled carbon nanotube-based nanofluids for improved heat dissipation. *RSC Adv* 2013;3:4199–206.
- [85] Chen LF, Cheng M, Yang DJ, Yang L. Enhanced thermal conductivity of nanofluid by synergistic effect of multi-walled carbon nanotubes and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles. *Appl Mech Mater* 2014;548–549:118–23.
- [86] Batmunkh M, Tanshen MR, Nine MJ, Myekhlai M, Choi H, Chung H, et al. Thermal conductivity of TiO<sub>2</sub> nanoparticles based aqueous nanofluids with an addition of a modified silver particle. *Ind Eng Chem Res* 2014;53(20):8445–51.
- [87] Madhesh D, Parameshwaran R, Kalaiselvam S. Experimental investigation on convective heat transfer and rheological characteristics of Cu–TiO<sub>2</sub> hybrid nanofluids. *Exp Therm Fluid Sci* 2014;52:104–15.
- [88] Sundar LS, Singh MK, Sousa ACM. Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT–Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/water hybrid nanofluids. *Int Commun Heat Mass Transf* 2014;52:73–83.
- [89] Sundar L.S., Singh M.K., Ramana E.V., Sing B., Gracio J., Sousa ACM. Enhanced thermal conductivity and viscosity of nanodiamond–nickel nanocomposite nanofluids. *Scientific Reports* 2014; 4: no. 4039.
- [90] Paul G, Philip J, Raj B, Das PK, Manna I. Synthesis, characterization, and thermal property measurement of nano-Al<sub>19</sub>Zn<sub>05</sub> dispersed nanofluid prepared by a two-step process. *Int J Heat Mass Transf* 2011;54:3783–8.
- [91] Maxwell JC. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford, UK: Clarendon Press; 1873.
- [92] Du YF, Lv YZ, Wang FC, Li XX, Li CR. Effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the breakdown strength of transformer oil. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, San Diego, CA; 2010.
- [93] Lee JC, Seo HS, Kim YJ. The increased dielectric breakdown voltage of transformer oil-based nanofluids by an external magnetic field. *Int J ThermSci* 2012;62:29–33
- [94] Ramadhan, A. I., Azmi, W. H., Mamat, R., Hamid, K. A., & Norsakinah, S. (2019). Investigation on stability of tri-hybrid nanofluids in water-ethylene glycol mixture. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 469, No. 1, p. 012068). IOP Publishing.
- [95] Ramadhan, A. I., Azmi, W. H., Mamat, R., & Hamid, K. A. (2020). Experimental and numerical study of heat transfer and friction factor of plain tube with hybrid nanofluids. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100782.

