

## Model Konduktivitas Termal Nanofluida Berdasarkan Grup Tak-Berdimensi dengan Parameter Termofisika Kompleks

Yuant Tiandho<sup>1,2\*)</sup> dan Fitri Afriani<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Pusat Kajian Energi dan Teknologi Informasi, Universitas Bangka Belitung

<sup>2)</sup> Jurusan Fisika, Universitas Bangka Belitung

Email korespondensi : [yuant@ubb.ac.id](mailto:yuant@ubb.ac.id)

DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v17i1.7235>

Submitted: 18 Oktober 2019; Accepted: 20 Februari 2020

**ABSTRACT**–This article presents a model of thermal conductivity of nanofluids based on dimensionless-group methods. In addition to the thermal conductivity of base fluids and nanoparticles, nanoparticle diameter, temperature, and volume fraction of nanoparticles, the proposed model involves several thermophysical parameters such as specific heat, density, and viscosity. The reason for the development of the model requires complex thermophysical parameters because, based on the experiments, these parameters determine the thermal conductivity of nanofluids. Validation of the model through comparison of the model with the experimental results shows that the models that have non-linear correlation have good accuracy in predicting the thermal conductivity of nanofluids.

**KEYWORDS** : conductivity; dimensionless-group; nanofluids; thermophysical parameter

### PENDAHULUAN

Teknologi transfer panas menggunakan fluida saat ini tengah dipelajari secara intensif dalam berbagai bidang seperti pada sistem pembangkit energi, teknologi produksi kimia, manufaktur, dan berbagai bidang modern lainnya (Hubner, Eck, Stiller, & Seitz, 2016; Matthews, Murley, Puettmann, Hickman, & Witt, 2015). Hal ini berkaitan dengan semakin maraknya isu reduksi emisi karbon dan upaya pengalihan energi pada sumber energi bersih dan terbarukan.

Untuk meningkatkan efisiensi proses transfer panas menggunakan fluida, salah satu metode yang diajukan oleh para peneliti adalah pengembangan nanofluida (Kumar, Kumar, Tamilarasan, Sendhilnathan, & Suresh, 2015). Nanofluida merupakan suatu suspensi yang mengandung nanopartikel atau fluida dengan nanopartikel yang didispersikan ke dalamnya. Beberapa contoh fluida yang digunakan adalah air, minyak, etilen glikol dan sebagainya. Sedangkan untuk jenis

nanopartikel diantaranya adalah logam oksida seperti CuO (Zhu, Wang, Yu, & Xie, 2018), TiO<sub>2</sub> (Ali, et al., 2018), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Sheikholeslami & Shehzad, 2018) dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Gupta, Singh, & Katyal, 2018). Hal menarik dari karakteristik nanofluida adalah sifat konduktivitas termalnya yang lebih tinggi dibandingkan dengan konduktivitas termal fluida dasarnya (*base fluids*) meskipun jumlah nanopartikel yang didispersikan ke dalamnya relatif kecil. Oleh karena itu nanofluida banyak dikembangkan dalam sistem transfer panas seperti pada kolektor surya dan sistem destilasi berbasis tenaga matahari (Subramani, Nagarajan, Wongwises, & El-Agouz, 2018; Arunkumar, Raj, Denkenberger, & Velraj, 2018).

Meskipun potensi pengembangan nanofluida dalam berbagai sistem transfer panas besar tetapi model teoritis mekanisme transfer panas terus diajukan sampai saat ini (Tiandho, Afriani, & Puriza, 2019; Tiandho, Gusa, Dinata, & Sunanda, 2018). Beberapa

**Tabel 1 Beberapa model konduktivitas termal nanofluida**

Model	Ungkapan
Maxwell (Mehta, Chauhan, & Kanagaraj, 2011)	$k_{nf} = k_{bf} \left( \frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})\phi}{k_p + 2k_{bf} - (k_p - k_{bf})\phi} \right)$
Xuan-Li (Xuan & Li, 2000)	$k_{nf} = k_{bf} \left( \frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})\phi}{k_p + 2k_{bf} + (k_p - k_{bf})\phi} \right)$
Lu-Lin (Lu & Lin, 1996)	$k_{nf} = k_f (1 + a\phi + b\phi^2)$
Jang-Choi (Jang & Choi, 2007)	$k_{nf} = k_{bf} (1 - \phi) + \beta k_p \phi + \phi h \delta_T$

model yang telah diajukan oleh para peneliti sebelumnya dipaparkan pada Tabel 1, dengan  $k_{nf}$  adalah konduktivitas efektif nanofluida,  $k_{bf}$  adalah konduktivitas fluida dasar,  $k_p$  adalah konduktivitas nanopartikel,  $\phi$  adalah fraksi volume nanopartikel,  $h$  adalah koefisien transfer panas konveksi,  $\delta_T$  adalah ketebalan lapisan batas (*boundary layer*) sedangkan  $a$ ,  $b$ , dan  $\beta$  adalah suatu konstanta yang nilainya bergantung pada jenis nanofluida.

Salah satu metode yang menarik dalam pengembangan model konduktivitas nanofluida adalah metode grup tak berdimensi (*dimensionless groups*). Metode ini dapat memberikan bentuk model konduktivitas nanofluida dengan sederhana secara matematis (Hosseini, Safaei, Goodarzi, Alrashed, & Nguyen, 2017). Namun demikian, beberapa model konduktivitas termal nanofluida yang telah diajukan dalam metode ini masih memiliki keterbatasan karena belum mengakomodir parameter termofisika seperti viskositas. Beberapa model konduktivitas termal yang telah diajukan melalui metode ini hanya mengakomodir beberapa parameter seperti konduktivitas nanopartikel, konduktivitas interfasial, ukuran nanopartikel, fraksi volume, dan temperatur. Padahal eksperimen telah menunjukkan bahwa viskositas memiliki dampak signifikan pada konduktivitas termal nanofluida (Tsai, Kuo, Chen, & Yang, 2008). Oleh karena itu, sebagai solusi dari permasalahan tersebut maka dalam artikel ini diajukan model konduktivitas termal nanofluida yang tersusun dari berbagai parameter termofisika seperti viskositas, densitas, dan kalor jenis.

## METODE PENELITIAN

Proses penyusunan model konduktivitas termal nanofluida berdasarkan metode grup tak berdimensi akan dipaparkan pada bagian ini. Konduktivitas termal nanofluida akan ditinjau sebagai fungsi dari konduktivitas fluida dasar ( $k_{bf}$ ), konduktivitas nanopartikel ( $k_p$ ), konduktivitas interfasial ( $k_i$ ), ukuran partikel ( $d$ ), fraksi volume nanopartikel ( $\phi$ ), lapisan batas hidrodinamik dan sebanding dengan diameter ekuivalen fluida dasar ( $d_{bf}$ ), temperatur ( $T$ ), temperatur referensi ( $T_0$ ), densitas fluida dasar ( $\rho_{bf}$ ), densitas nanopartikel ( $\rho_p$ ), kalor jenis fluida dasar ( $c_{bf}$ ), kalor jenis nanopartikel ( $c_p$ ), viskositas fluida dasar ( $\mu_{bf}$ ), dan viskositas yang diakibatkan oleh gerak Brownian nanopartikel dalam fluida dasar ( $\mu_B$ ):

$$k_{nf} = f \left( k_{bf}, k_p, k_i, d_p, d_{bf}, \phi, T, T_0, \rho_{bf}, \rho_p, c_{bf}, c_p, \mu_{bf}, \mu_B \right) \quad (1)$$

Grup tak berdimensi dari fungsi konduktivitas termal nanofluida dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\pi_1 = k_{nf} / k_{bf} \quad (1)$$

$$\pi_2 = k_i / k_p \quad (2)$$

$$\pi_3 = d_{bf} / d_p \quad (3)$$

$$\pi_4 = \rho_{bf} / \rho_p \quad (4)$$

$$\pi_5 = c_{bf} / c_p \quad (5)$$

$$\pi_6 = T / T_0 \quad (6)$$

$$\pi_7 = \mu_{bf} / \mu_B \quad (7)$$

$$\pi_8 = \phi \quad (8)$$

Apabila dilakukan tinjauan untuk salah satu grup maka dapat diperoleh suatu fungsi yang mendefinisikan kaitan antar grup. Karena artikel ini bertujuan untuk memperoleh ungkapan model konduktivitas termal nanofluida maka dipilih grup rasio antara  $k_{nf}$  dengan  $k_{bf}$  yang disebut sebagai  $k_r$ . Dengan demikian grup yang akan ditinjau akan menghasilkan hubungan:

$$\pi_1 = k_r = \frac{k_{nf}}{k_{bf}} = f_1 \left( \frac{k_i}{k_p}, \frac{d_{bf}}{d_p}, \frac{\rho_{bf}}{\rho_p}, \frac{c_{bf}}{c_p}, \frac{T}{T_0}, \frac{\mu_{bf}}{\mu_B}, \phi \right) \quad (9)$$

Konduktivitas nanofluida lebih tinggi dari konduktivitas fluida dasar ( $k_{nf} > k_{bf}$ ) sehingga dapat dituliskan hubungan, (Moghdassi, Hosseini, Henneke, & Elkamel, 2009),

$$k_r = \frac{k_{nf}}{k_{bf}} > 1 \Rightarrow k_r = 1 + R \quad (10)$$

dengan  $R$  adalah faktor peningkatan konduktivitas termal nanofluida. Berdasarkan metode grup tak berdimensi nilai  $R$  dapat ditentukan dari parameter-parameter yang mempengaruhi nilai konduktivitas termal nanofluida seperti pada fungsi  $f_1$ ,

$$R = \gamma B \quad (11)$$

dengan  $B = \left(\frac{k_i}{k_p}\right)^\alpha \left(\frac{d_{bf}}{d_p}\right)^\beta \left(\frac{\rho_{bf}}{\rho_p}\right)^\delta \left(\frac{c_{bf}}{c_p}\right)^\eta \left(\frac{T}{T_0}\right)^\zeta \left(\frac{\mu_{bf}}{\mu_B}\right)^\sigma (\phi)^\chi$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ ,  $\sigma$ , dan  $\chi$  adalah konstanta empiris yang bergantung pada jenis nanofluida. Sehingga melalui substitusi Pers. (12) pada Pers. (11) diperoleh

$$k_r = 1 + \gamma B \quad (12)$$

Tampak bahwa hubungan perbandingan pada Pers. (13) mengandung berbagai parameter termodinamika secara lengkap. Untuk kasus nanofluida dengan variasi ukuran dan fraksi volume nanopartikel maka Pers. (13) akan mereduksi pada hubungan konduktivitas termal nanofluida yang diusulkan oleh Moghdassi dkk. (Moghdassi, Hosseini, Henneke, & Elkamel, 2009):

$$k_r = 1 + m \frac{\phi^\chi}{d_p^\beta} \quad (13)$$

dengan  $m$  adalah suatu konstanta gabungan

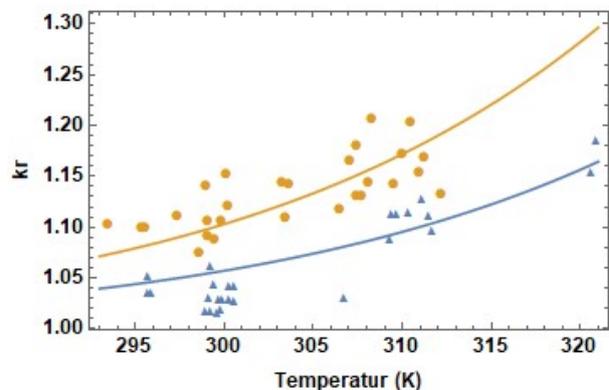
dari berbagai parameter dalam Pers. (13). Sedangkan untuk tinjauan yang melibatkan parameter temperatur selain fraksi volume nanopartikel dan ukuran nanopartikel maka Pers. (13) akan mereduksi pada hubungan yang diusulkan oleh Hosseini et al. (Hosseini, Safaei, Goodarzi, Alrashed, & Nguyen, 2017):

$$k_r = 1 + j \left( \frac{\phi^\chi}{d_p^\beta} \right) \left( \frac{T}{T_0} \right)^\zeta \quad (14)$$

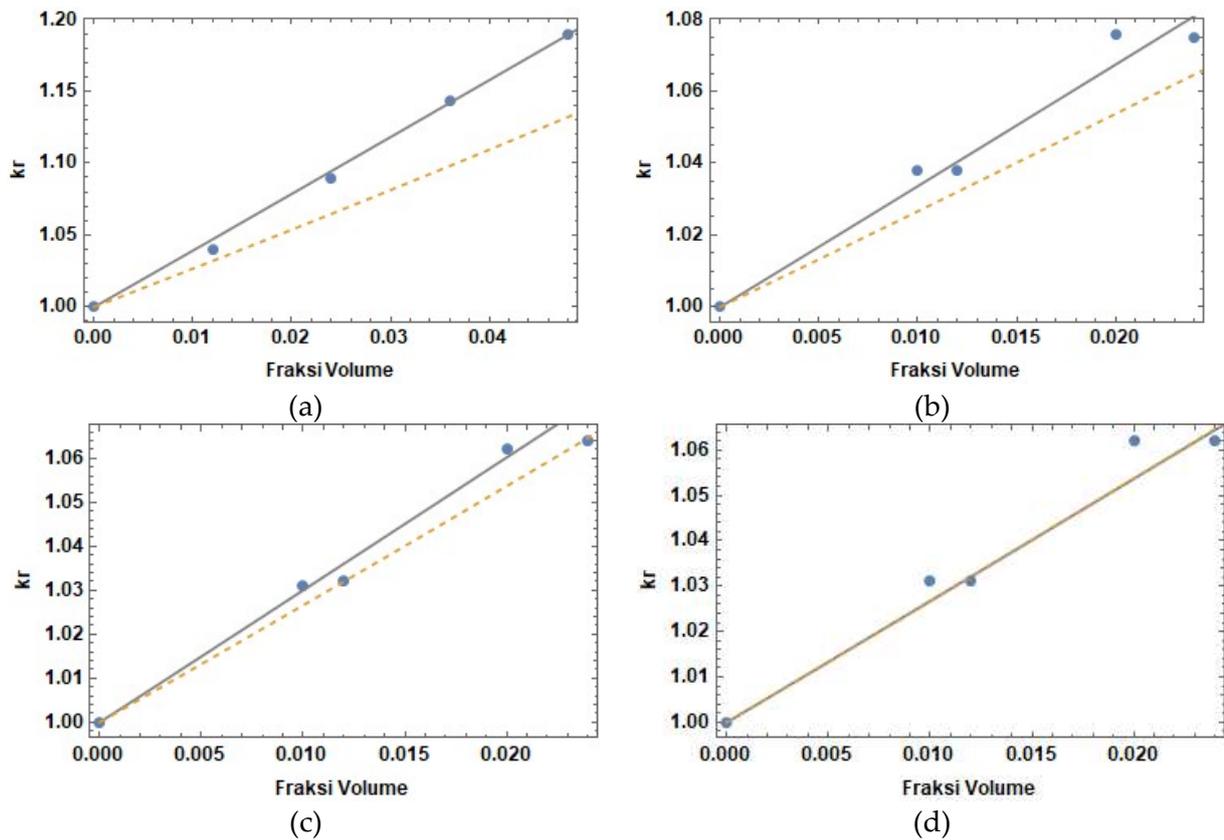
dengan  $j$  adalah konstanta gabungan yang analogi dengan  $m$  pada Pers. (14). Validasi model yang diajukan pada Pers. (15) dilakukan dengan membandingkan model dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya. Pencocokan model dengan data eksperimen dilakukan melalui metode komputasi *fitting* regresi non-linear. Secara eksplisit, validasi dilakukan berdasarkan analisis regresi dengan teknik kuadrat terkecil (*least square technique*) untuk memperoleh konstanta-konstanta yang belum diketahui dan nilai kecocokannya ditentukan berdasarkan parameter  $R^2$ .

## HASIL DAN PEMBAHASAN

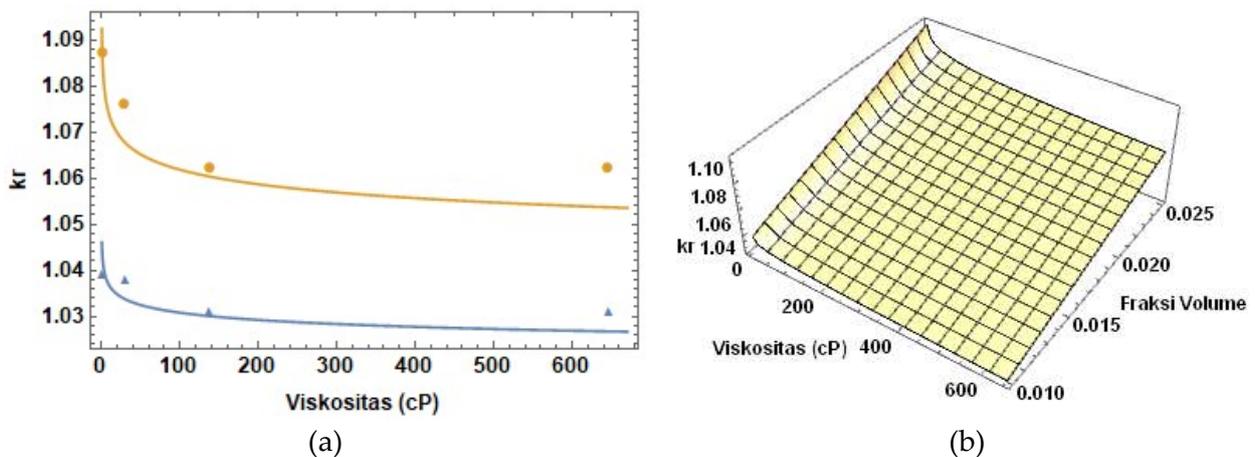
Di dalam bagian ini dilakukan pencocokan model yang diajukan pada Pers. (15) dengan hasil eksperimen. Pengujian model pertama dilakukan pada eksperimen Mintsu dkk. (Mintsu, Roy, Ngyuen, & Doucet, 2009) terkait hubungan antara ukuran nanopartikel, fraksi volume, dan temperatur terhadap konduktivitas termal nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Perbandingan antara model yang diajukan dengan data eksperimen ditunjukkan



Gambar 1 Perbandingan antara model  $k_r$  (garis) pada Pers. (13) dengan data eksperimen nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Mintsu, Roy, Ngyuen, & Doucet, 2009): (●):  $\phi$ : 6%,  $d_p$ : 36 nm dan (▲):  $\phi$ : 4%,  $d_p$ : 40 nm



Gambar 2 Perbandingan antara hasil eksperimen (Tsai, Kuo, Chen, & Yang, 2008) (titik), model yang diajukan (garis hitam solid), dan model konduktivitas termal Maxwell (garis putus-putus) untuk nanofluida dengan viskositas fluida dasar: (a) 4,18 cP, (b) 31,8 cP, (c) 140,4 cP, dan (d) 648 cP



Gambar 3 (a) Perbandingan viskositas dan  $k_r$  berdasarkan model pada Pers. (16) (garis) dengan data eksperimen (Tsai, Kuo, Chen, & Yang, 2008): (•):  $\phi$ : 2% dan (▲):  $\phi$ : 1%; (b) plot 3-dimensi hubungan antara fraksi volume, viskositas, dan  $k_r$ .

oleh Gambar 1. Melalui Gambar 1 tampak bahwa model yang diajukan memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi dengan data eksperimen. Adapun nilai konstanta parameter model untuk nanofluida  $Al_2O_3$  pada eksperimen ini adalah:  $j = 28,1026$ ;  $\chi = 1,31487$ ;  $\beta = 0,53284$ ;  $\zeta = 15,6173$  dengan nilai  $R^2 = 0,9994$ . Selain itu, berdasarkan parameter model yang diperoleh dapat dinyatakan bahwa

konduktivitas termal nanofluida  $Al_2O_3$  sebanding dengan fraksi volume dan temperatur serta berbanding terbalik dengan diameter nanopartikel  $Al_2O_3$ .

Pengujian selanjutnya dilakukan pada nanofluida dengan variasi parameter berupa fraksi volume nanopartikel serta viskositas fluida dasarnya. Data eksperimen diperoleh dari penelitian Tsai et al. (Tsai, Kuo, Chen, &

Yang, 2008). Variasi viskositas dari fluida dasar dilakukan melalui variasi komposisi pada pencampuran fluida dasar yang digunakan yaitu, minyak diesel dan *polydimethylsiloxane* (PMDS). Kedua jenis fluida dasar tersebut memiliki konduktivitas termal yang tidak jauh berbeda, masing-masing yaitu 0,14 dan 0,15 W/m K tetapi nilai viskositasnya sangat berbeda yaitu 4,188 dan 5500 cP secara berurutan. Sehingga penggabungan antara kedua fluida dasar tersebut tidak mengubah nilai konduktivitas termalnya secara signifikan. Adapun nanopartikel yang didispersikan dalam fluida dasar adalah  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dengan diameter 10 nm. Karena eksperimen yang akan dianalisis hanya bergantung pada fraksi volume dan viskositas fluida dasar maka Pers. (13) dapat direduksi menjadi,

$$k_r = 1 + n(\mu_{bf}^\sigma \phi^z) \quad (15)$$

dengan  $n$  adalah konstanta yang merangkum berbagai parameter selain viskositas fluida dasar dan fraksi volume.

Setelah melalui proses pencocokan data (*data fitting*) maka diketahui nilai-nilai dari parameter empiris pada Pers. (16) sebagai berikut:  $n = 4,45277$ ;  $\sigma = -0,0757196$ ;  $\chi = 1,00422$  dengan nilai  $R^2 = 0,999$ . Sebagai perbandingan, pada Gambar 2 disajikan komparasi antara data eksperimen dengan model pada Pers. (16) dan juga dengan model  $k_r$  yang diajukan oleh Maxwell. Tampak bahwa model pada Pers. (16) memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dari model yang diajukan oleh Maxwell. Model yang diajukan oleh Maxwell akan memiliki nilai yang berhimpit dengan dengan model pada Pers. (16) ketika kondisi viskositas fluida dasar bernilai tinggi. Selain itu, melalui hasil pencocokan data tampak dengan jelas bahwa nilai  $k_r$  berbanding lurus dengan fraksi volume nanopartikel dan berbanding terbalik dengan viskositasnya.

Untuk meningkatkan validitas hasil pencocokan data dengan model yang diajukan, pada Gambar 3(a) disajikan komparasi antara model pada Pers. (16) dengan data eksperimen berdasarkan variasi viskositas untuk fraksi volume nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sebesar 1% dan

2%. Tampak bahwa model yang diajukan memiliki tingkat akurasi yang baik dalam memprediksi nilai  $k_r$  berdasarkan variasi viskositas. Selain itu, pada Gambar 3(b) ditunjukkan hubungan antara viskositas fluida dasar, fraksi volume nanopartikel dan  $k_r$  melalui plot 3-dimensi. Melalui hasil tersebut tampak dengan jelas bahwa nilai konduktivitas termal pada nanofluida berbanding lurus dengan fraksi volume nanopartikel dan berbanding terbalik dengan viskositas fluida dasar.

## KESIMPULAN

Di dalam penelitian ini telah dipaparkan suatu model konduktivitas termal nanofluida berdasarkan metode grup tak berdimensi. Model konduktivitas nanofluida yang diajukan di dalam penelitian ini meninjau parameter-parameter termofisika yang kompleks baik dari sisi fluida dasar seperti: konduktivitas termal, diameter ekuivalen, densitas, kalor jenis, serta viskositas; dari sisi nanopartikel seperti: konduktivitas termal, ukuran partikel, densitas, kalor jenis; serta parameter lain seperti konduktivitas interfasial, viskositas Brownian, dan fraksi volume nanopartikel. Pada praktiknya, model yang diajukan tersebut dapat direduksi sesuai dengan parameter yang diuji dalam eksperimen. Melalui komparasi antara model yang diajukan dengan data eksperimen, maka dapat disimpulkan bahwa model yang diajukan dapat diterima dengan baik dan dapat memberikan gambaran hubungan non-linear dari berbagai parameter termofisika pada konduktivitas nanofluida. Selanjutnya, model yang diajukan di dalam artikel ini dapat juga dapat digunakan untuk berbagai jenis nanofluida lainnya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia (No. 052/SP2H/LT/DRPM/2019).

## REFERENSI

Ali, H., Babar, H., Shah, T., Sajid, M., Qasim, M., & Javed, S. (2018). Preparation

- techniques of TiO<sub>2</sub> nanofluids and challenges: a review. *Applied Sciences*, 8, 587.
- Arunkumar, T., Raj, K., Denkenberger, D., & Velraj, R. (2018). Heat carrier nanofluids in solar still - A review. *Desalination and Water Treatment*, 130, 1-16.
- Gupta, M., Singh, V., & Katyal, P. (2018). Synthesis and structural characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 5(14), 27989-27997.
- Hosseini, S., Safaei, M., Goodarzi, M., Alrashed, A., & Nguyen, T. (2017). New temperature, interfacial shell dependent dimensionless model for thermal conductivity of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, 207-210.
- Hubner, S., Eck, M., Stiller, C., & Seitz, M. (2016). Techno-economic heat transfer optimization of large scale latent heat energy storage systems in solar thermal power plants. *Applied Thermal Engineering*, 98, 483-491.
- Jang, S., & Choi, S. (2007). Effects of various parameters on nanofluid thermal conductivity. *Journal of Heat Transfer*, 129, 617-623.
- Kumar, P., Kumar, J., Tamilarasan, R., Sendhilnathan, S., & Suresh, S. (2015). Review on nanofluids theoretical thermal conductivity models. *Engineering Journal*, 19, 67-83.
- Lu, S., & Lin, H. (1996). Reflective conductivity of composite containing aligned spherical inclusions of finite conductivity. *Journal of Applied Physics*, 79, 6761-6769.
- Matthews, L., Murley, A., Puettmann, A., Hickman, D., & Witt, P. (2015). Lifelong Learning: Batch Reactor Kinetic and Heat Transfer Modeling of the METHOCEL™ Production Process. *Chemical Engineering Education*, 49, 201-207.
- Mehta, S., Chauhan, K. P., & Kanagaraj, S. (2011). Modeling of thermal conductivity of nanofluids by modifying Maxwell's equation using cell model approach. *J. Nanopart. Res.*, 13, 2791-2798.
- Mintsa, H., Roy, G., Ngyuen, C., & Doucet, D. (2009). New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 363-373.
- Moghdassi, A., Hosseini, S., Henneke, D., & Elkamel, A. (2009). A model of nanofluids effective thermal conductivity based on dimensionless groups. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 96, 81-84.
- Sheikholeslami, M., & Shehzad, S. (2018). Numerical analysis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid flow in permeable media under the effect of external magnetic source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118, 182-192.
- Subramani, J., Nagarajan, P., Wongwises, S., & El-Agouz, S. (2018). Experimental study on the thermal performance and heat transfer characteristics of solar parabolic through collector using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37, 1149-1159.
- Tiandho, Y., Afriani, F., & Puriza, M. (2019). An explicit model of temperature-dependent thermal conductivity for nanofluids. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 353, 012013.
- Tiandho, Y., Gusa, R., Dinata, I., & Sunanda, W. (2018). Model for nanofluids thermal conductivity based on

modified nanoconvection mechanism.  
*E3S Web of Conferences*, 73, 01015.

Tsai, T., Kuo, L., Chen, P., & Yang, C. (2008).  
Effect of viscosity of base fluid on  
thermal conductivity of nanofluids.  
*Applied Physics Letter*, 93, 233121.

Xuan, Y., & Li, Q. (2000). Heat transfer  
enhancement of nanofluids.

*International Journal of Heat and  
Fluids Flow*, 21, 58-64.

Zhu, F., Wang, L., Yu, W., & Xie, H. (2018).  
Intriguingly high thermal conductivity  
increment for CuO nanowires  
contained nanofluids with low  
viscosity. *Scientific Reports*, 8, 5282.