

Summary of potential applications of nanofluids

Zusammenfassung potentieller Anwendungsbereiche von Nanofluiden

Emil Grigorov

FDIBA, Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria

Abstract — Nanofluids are nanoscale suspensions in liquids. Due to the better material properties of the nanoparticles compared to a fluid, the expectation to achieve an improvement of the general behavior in heat transfer is high. The present work deals with the investigation of the effects of nanofluids on the change of heat transfer in a system. In the first part, a general presentation of nanofluids is carried out. Literature research on the behavior of the suspensions is presented. In the second part the latest state of the art on the application possibilities of nanofluids and the associated potential for improvement in heat transfer will be presented: solar thermal, automotive electronics and others. In the end, the most important challenges for the use of nanofluids will be briefly addressed.

Zusammenfassung — Nanofluide sind nanoskalige Suspensionen in Flüssigkeiten. Aufgrund der besseren Materialeigenschaften der Nanopartikel ist eine Verbesserung des allgemeinen Verhaltens bei der Wärmeübertragung zu erwarten. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Auswirkungen von Nanofluiden auf die Änderung der Wärmeübertragung in einem System. Im ersten Teil werden die allgemeinen physikalischen Eigenschaften der Nanofluide vorgestellt. Im zweiten Teil wird der neueste Stand der Technik über die Anwendungsmöglichkeiten von Nanofluiden und das damit verbundene Verbesserungspotenzial in verschiedenen Wärmeübertragungsprobleme vorgestellt, wie z.B.: Solarthermie, Automobilelektronik u.a. Am Ende, werden die wichtigsten Herausforderungen bei dem Einsatz von Nanofluiden kurz angesprochen.

I. EINFÜHRUNG

Die Optimierung der Wärmeeffizienz ist angesichts des ständig steigenden Energieverbrauchs in der heutigen Welt kritisch und herausfordernd. Die Verbesserung der Erwärmung oder Kühlung in einem industriellen bzw. alltäglichen Prozess kann zu Energieeinsparungen führen, die Prozesszeit verkürzen, die Wärmeleistung erhöhen oder die Lebensdauer von Anlagen verlängern. Daher sind Ingenieure und Wissenschaftler ständig auf der Suche nach Verbesserungspotenzial bei der Entwicklung neuer Technologien und Konzepte im Bereich der Wärmeübertragung. Eine aktive Möglichkeit die erwünschte Optimierung zu erreichen, kann über die Änderung der Stoffeigenschaften des eingesetzten Wärmeträgermediums erzielt werden. Häufig verwendete Wärmeträgerflüssigkeiten wie Wasser und Ethylenglykol (EG) weisen im Vergleich zu Feststoffen relativ niedrige Wärmeleitfähigkeiten auf [2]. Daher ist es berechtigt, die Verbesserung der thermischen Eigenschaften dieser Flüssigkeiten durch Zugabe fester Teilchen zu erwägen. Durch die Entwicklung der Nanotechnologien ist die Herstellung von Feststoffpartikeln im Nanometerbereich und auch ihre Dispergierung in einer Basisflüssigkeit möglich. Diese Arten von Suspensionen werden als Nanofluide bezeichnet [1].

Da die Transporteigenschaften von Nanofluiden (Wärmeleitfähigkeit, dynamische Viskosität) nicht nur vom Volumenanteil (ϕ) der Nanopartikel abhängen, sondern auch stark von anderen Parametern wie Partikelform, Größe, Mischungsverfahren, sind noch keine allgemeinen Zusammenhänge festgestellt, die das gemeinsame Verständnis der Nanofluidmechanismen erlauben. Verschiedene theoretische und experimentelle Arbeiten beschäftigen sich mit der Beschreibung von der Wärmeleitfähigkeit und der Viskosität von Nanofluiden, eine Zusammenfassung der in der Literatur vorgeschlagenen Korrelationen für die beiden Größen kann in [23-24] gefunden werden. Generell ist aber eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit und der dynamischen

Viskosität durch den Einsatz von Nanofluiden, im Vergleich zur Basisflüssigkeit zu erkennen [1]. Im Gegensatz dazu werden die Dichte und die Wärmekapazität von Nanofluiden physikalisch korrekt durch Mischungsregeln vorhergesagt. In Gleichung (1) ist die Beziehung für die Dichte eines Nanofluids (nf), in Abhängigkeit von der Dichte der Nanopartikel (np) und des Basisfluids (bf) dargestellt.

$$\rho_{nf} = \phi \rho_{np} + (1 - \phi) \rho_{bf} \quad (1)$$

Die Wärmekapazität eines Nanofluids lässt sich dann nach [25] folgendermaßen berechnen:

$$c_{p,nf} \rho_{nf} = \phi c_{p,np} \rho_{np} + (1 - \phi) c_{p,bf} \rho_{bf} \quad (2)$$

In Gleichung (2) kann man sehen, dass die Wärmekapazität des Nanofluids steigen würde, wenn die spezifische Wärme des Partikelmaterials höher als die des Basisfluids wäre. Ebenso würde die Wärmekapazität der Suspension abnehmen, wenn die spezifische Wärme des Feststoffs geringer als die des Basisfluids wäre. Die Werte für c_p für Feststoffpartikel sind typischerweise niedriger als die von reinen Flüssigkeiten [2]. Daher führt die Zugabe von Nanopartikeln in der Regel zu einer Verringerung der Wärmekapazität des Nanofluids, im Vergleich zur Basisflüssigkeit.

Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit werden für die Herstellung von Nanopartikeln vorwiegend Metallen (Cu, Al, Zn, Fe), Metalloxide (Al_2O_3 , SiO_2 , ZnO, CuO) aber auch Diamanten verwendet [1].

Nanofluide werden seit fast zwei Jahrzehnten für Anwendungen als fortschrittliche Wärmeträgerflüssigkeiten betrachtet. Aufgrund der großen Vielfalt und Komplexität der Nanofluidsysteme ist jedoch noch keine Einigung über die Größenordnung der potenziellen Vorteile der Verwendung von den Suspensionen für Wärmeübertragungsanwendungen erzielt. In diesem Artikel wird deswegen eine Zusammenfassung des aktuellsten Stands der Literatur

bezüglich der Anwendungen und Herausforderungen von Nanofluiden zusammengestellt.

II. ANWENDUNGSBEREICHE VON NANOFLUIDEN

A. Allgemeine Betrachtungen

Die Erhöhung der effektiven Wärmeleitfähigkeit ist wichtig für die Verbesserung des Wärmeübertragungsverhaltens von Flüssigkeiten. Eine Reihe weiterer Variablen spielen ebenfalls eine Schlüsselrolle. So hängt beispielsweise der Wärmeübertragungskoeffizient für die erzwungene Konvektion in Rohren von vielen physikalischen Größen ab, die sich auf das Fluid oder die Geometrie des Systems beziehen, durch das das Fluid fließt. Diese Größen beinhalten intrinsische Eigenschaften des Fluids wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme, Dichte und Viskosität sowie extrinsische Systemparameter wie Rohrdurchmesser und -länge sowie durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit [2].

Das Verständnis der Fluideigenschaften bei einem Nanofluid ist ausschlaggebend für die Ermittlung der Veränderungen in den Wärmeübertragungsverhältnissen. Viele Studien befassen sich somit mit den Auswirkungen der Volumenkonzentration, Material und Größe der verwendeten Nanopartikel auf die Wärmeübertragungsverhältnisse im System. Generell wird eine Erhöhung der gemessenen Wärmeübertragungseffekte betrachtet, bei Erhöhung der Volumenkonzentration und der Nanopartikelgröße. So werden in [3] die thermischen Eigenschaften von drei verschiedene Nanopartikeln in Wasser experimentell und numerisch bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit und Viskosität von den Nanofluiden werden für Volumenkonzentrationen zwischen 1% und 2,5% ermittelt. Die gemessenen Daten zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit und die Viskosität mit ansteigender Volumenkonzentration zunehmen. Die Simulationsergebnisse kommen zu dem Schluss weiterhin, dass der Reibungsfaktor und die Nusselt-Zahl (Nu) mit zunehmender Volumenkonzentration zunehmen. In [4] wird wiederum die Wärmeleitfähigkeit für sieben Nanopartikelgrößen im Bereich von 8 bis 282 nm von Al_3O_2 -Nanofluid gemessen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Verbesserung in der Fluidwärmeleitfähigkeit abnimmt, sobald die Partikelgröße unter 50 nm sinkt. Die Autoren führen diese Abnahme auf eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit der Nanopartikel selbst ab dieser Partikelgröße zurück. In [3] wird eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit eines Al_3O_2 Nanofluids um 38%, bei einer Partikelgröße von 5 nm und um 33% bei 50 nm Partikel, mit Erhöhung der Massenkonzentration der Nanopartikel auf etwa 20%. Andere Studien zeigen dagegen eine sehr geringfügige Änderung (<1%) bei Vergrößerung der Nanopartikel und Erhöhung ihrer Volumenkonzentration [6].

In [6] und [11] wird experimentell für Aluminiumoxid (Al_3O_2) und Siliziumdioxid (SiO_2) gezeigt, dass das thermische Verhalten newtonscher Nanofluiden durch die in der Literatur (z.B. [2]) gegebenen Korrelationen für die Nu -Zahl für einphasige Wärmeübertragungsprozesse in guter Näherung beschrieben wird. Es sind, laut den Autoren, keine anomalen Phänomene erkennbar, die an den thermischen Prozessen beteiligt sind, sodass die bekannten Korrelationen der Form:

$$Nu = f(GEO, Re_{nf}, Pr_{nf}) \quad (3)$$

für die Beschreibung einer Nanofluidströmung verwendet werden können. Dabei fasst GEO die geometrischen Parameter des Systems zusammen, Re_{nf} und Pr_{nf} repräsentieren die entsprechende Reynolds- bzw. Prandl-Zahl des Nanofluids.

Eine Reihe weiterer Studien beschäftigt sich mit der numerischen Beschreibung des Verhaltens von Nanofluiden. In

[12] wird z.B. eine Untersuchung der Entwicklung der erzwungenen konvektiven Wärmeübertragung und des Druckabfalls einer Nanofluidströmung in einem Rohr unter konstanter Wandrandbedingung, vorgestellt. Die einphasige homogene und zwei zweiphasige Modelle mit konstanten und temperaturabhängigen Eigenschaften werden vorgestellt und verwendet, um ihre Beschreibung des dargestellten Problems zu bewerten. Die Ergebnisse werden einem intensiven Vergleich mit den verfügbaren experimentellen Daten und numerischen Werken in der Literatur unterzogen. Es wird beobachtet, dass das zweiphasige Lagrange Modell (DPM) die Werte der Wärmeübertragungskoeffizienten deutlich überschätzt und die Ergebnisse des Mischungsmodells eine unrealistische Zunahme der Wärmeübertragung zeigt, insbesondere für hohe Partikelvolumenanteile.

Eine weitere Frage, bezüglich der Nanofluidanwendungen bezieht sich auf die veränderte Menge, der abgegebenen bzw. zugeführten thermischen Energie im Vergleich zum Basisfluid. In [11] wird von fünf unabhängigen Forschungsgruppen experimentell gezeigt, dass die Erhöhung der Nu -Zahl beim Nanofluid, unabhängig vom verwendeten Material, Größe sowie Konzentration der Nanopartikel, der Erhöhung des Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum Basisfluid entspricht, wenn ähnliche thermodynamische und fluidmechanische Verhältnisse in der Strömung (gleiche Re und Pr) herrschen. Die Erhöhung liegt zwischen 10 % - 15 %. Andere Studien berichten von einer deutlich höheren Vergrößerung des Wärmeübergangskoeffizienten (20%-40%) [28-31]. Aus diesem Grund ist das Potential und die genauen Auswirkungen von Nanofluiden auf die Wärmeübertragung noch umstritten.

B. Solarthermie und Wärmepumpen

Eine Anwendungsmöglichkeit die beschriebenen Eigenschaften von Nanofluiden praktisch einzusetzen, bieten Solarabsorber, bei denen die aufgenommene Sonnenwärme direkt oder indirekt an die Solarflüssigkeit abgegeben wird und über den Solarkreislauf an den jeweiligen Speicher verbracht wird. Der am häufigsten verwendete Solarkollektor ist die schwarze Oberfläche als Strahlungsabsorber, dessen thermische Energieeffizienz, aufgrund der schlechten Stoffeigenschaften der Arbeitsflüssigkeit, in den meisten Fällen relativ gering ist. So wird in [10] die Wirkung von einem Al_3O_2 Nanofluid als Arbeitsmedium für einen direkten Solarabsorber untersucht. Der Extinktionskoeffizient von dem wasserbasiertem Nanofluid wird bewertet, indem die Größe der Nanopartikel und der Volumenanteil variiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Partikelgröße einen minimalen Einfluss auf die optischen Eigenschaften von dem Nanofluid hat. Andererseits ist der Extinktionskoeffizient linear proportional zum Volumenanteil. Die Verbesserung ist vielversprechend beim Volumenanteil von 1,0% und das Nanofluid ist für die Lichtwelle nahezu undurchsichtig. Ähnliche Ergebnisse werden in [13] und [31,33] beobachtet. Eine Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades um 31,64% wird gemessen bei dem Einsatz eines Al_3O_2 Nanofluids mit 1,5% Volumenkonzentration.

Der Einsatz von Nanofluiden als Arbeitsflüssigkeiten in Kälte-, Klima- und Wärmepumpensystemen hat genauso viel Aufmerksamkeit und Interesse erweckt wie bei solarthermischen Anlagen. So wird beispielsweise in [5] TiO_2 in Kombination mit R22 in einer Wärmepumpe als Kältemittel eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zugabe von Nanopartikeln kaum eine Auswirkung auf die vom Verdampfer aufgenommene Wärme hat. Eine leichte Erhöhung von der im Kondensator abgegebenen Wärmemenge wird auf der anderen Seite gemessen. Als Ergebnis, verglichen mit der Verwendung von reinem R22, bei Verwendung von R22 + TiO_2 wird der

COP-Wert des Kühlkreislaufs leicht verringert, der COP-Wert des Heizzyklus wird jedoch erhöht.

C. Automobilindustrie

Die ständig wachsende Energiekrise sowie der enorme Kraftstoffverbrauch heutzutage, haben zu einem Wettbewerb zwischen Automobilherstellern geführt. Dementsprechend müssen die Konstrukteure die aerodynamischen Konstruktionen von Fahrzeugen verbessern, um den Energiebedarf zur Überwindung der Widerstandskraft zu reduzieren. Laut [13] gehen mehr als 50% der gesamten Fahrzeugenergie bei der Überwindung des Luftwiderstands verloren. Mitverantwortlich dafür ist die große Kühlerposition in der Fahrzeugfront. Daher ist es erforderlich, schlechtes Kühlmedium, wie z.B. EG-Wasser-Gemisch, durch bessere Flüssigkeiten, z.B. durch Nanofluide zu ersetzen, um Wärme aus kleineren Größen abzuführen.

Viele Forscher werden angezogen, die Verwendung von Nanofluiden als Motorkühlmittel experimentell oder numerisch zu untersuchen. Die meisten Studien berichten von einer deutlichen Verbesserung der thermischen Eigenschaften durch den Einsatz von Nanofluiden, im Vergleich zu herkömmlichen Kühlmitteln. Darüber hinaus geben einige Autoren an, dass die Stirnfläche des Kühlers durch den Einsatz von nanofluidbasierten Kühlmitteln um bis zu 10% reduziert werden kann [14-15]. Dies wiederum kann dazu führen, den Luftwiderstand zu reduzieren und bis zu 5% Kraftstoff zu ersparen. Die Motorkühlung ist nicht die einzige mögliche Anwendung von Nanofluiden in der Automobilindustrie. Nanofluide können auch zur Kühlung anderer beweglicher Teile in einem Fahrzeug eingesetzt werden. In [16-17] werden Nanopartikel in Motorgetriebeöl dispergiert. Die Autoren berichten von einer höheren thermischen Leistung beim Einsatz von den Suspensionen, da sie sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Geschwindigkeiten die niedrigsten Arbeitstemperaturen in der Getriebe erzeugen.

D. Elektronik

Die Wärmeübertragung bei mittleren und niedrigen Temperaturen kann ebenfalls durch die veränderten Stoffeigenschaften der Nanofluide beeinflusst werden. Diese werden als Arbeitsflüssigkeit in Wärmerohren und Thermosiphons eingesetzt, die für die kompakte Geräte Kühlung, z.B. in elektronischen Geräten, eingesetzt werden. Darüber hinaus berichten einige Autoren über den verbesserten Einsatz von Nanofluiden in Flüssigkeitsblöcken in der Elektronik Kühlung, im Vergleich zu herkömmlichen Flüssigkeiten. Tatsächlich können die innovativen Kühlmethode wie Minikanalsysteme zusammen mit Nanofluiden die Effizienz der Wärmeabfuhr erheblich verbessern und den Kühlbedarf von hochwärmeezeugenden elektronischen Geräten decken.

In [18] wird eine experimentelle Untersuchung der Wärmeübertragung von Kühlmitteln mit suspendierten Nanopartikeln (Al_3O_2) in einem Radialflusskühlgerät durchgeführt. Es wird eine gleichmäßige, laminare radiale Strömung eines Nanofluids zwischen einer erwärmten Scheibe und einer flachen Platte mit axialer Kühlmittleinspritzung berücksichtigt. Die Studie bestimmt den Einfluss von Volumenkonzentration und *Re*-Zahl auf die mittlere *Nu*-Zahl. Mit zunehmender Konzentration wird der konvektive Anteil der Wärmeübertragung verbessert, lokale *Nu*-Zahl nimmt zu. Parallele Kanalflüssigkeitsblöcke werden am häufigsten verwendet, wenn es um Kühlkörper in der Elektronik Kühlung mit Nanofluiden geht. Diese Kühlkörper verfügen in der Regel über runde oder rechteckige Kanäle. In [9] wird der Einfluss von Nanofluiden auf die Wirksamkeit eines parallelkanaligen

Flüssigkeitsblocks für die Kühlung eines Central Processing Unit (CPU) numerisch und experimentell untersucht. Die experimentelle Studie wird für Wasser und CuO-Wasser Nanofluid durchgeführt, während die numerische Simulation für den laminaren Strömungsbereich eingesetzt wird. Die thermische Verbesserung mit dem Nanofluid beträgt bis zu 7,7%, im Vergleich zum reinen Wasser.

In [8] wird die Wärmeübertragungsleistung eines konventionellen Mikrokanal-Flüssigkeitsblocks mit kreisförmigen Kanälen unter Verwendung von drei verschiedenen Nanofluiden bewertet, TiO_2 -Wasser, Al_3O_2 -Wasser und CuO-Wasser. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die thermische Wirksamkeit durch die Verwendung von CuO-Wasser-Nanofluid als Kühlmittel deutlich verbessert, die Al_3O_2 -Wasser und TiO_2 -Wasser Suspensionen weisen dagegen eine geringere Verbesserung auf. Ähnliche Ergebnisse werden in [32,35-36] betrachtet.

In [7] wird der Einsatz von TiO_2 -Wasser und Al_3O_2 -Wasser Nanofluide als Kühlmittel in einem Wärmerohr bewertet, der mit einer thermoelektrischen Kühlung verbunden ist. Im Vergleich zu den anderen herkömmlichen Kühlverfahren zeigt diese kombinierte Kühltechnik mit Nanofluiden eine höhere Reduktion der Chiptemperatur. Es wird gezeigt, dass die Nanofluide neben der Temperaturdifferenz zwischen Kühlmittel und Heizwand auch zur Verringerung des Wärmewiderstands führen.

III. HERAUSFORDERUNGEN BEI DER ANWENDUNG VON NANOFLUIDEN

In vielen Studien wird der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von Nanofluiden die größte Aufmerksamkeit geschenkt. Der Einsatz von suspendierten Fluiden erscheint in einer Vielzahl von Anwendungen vielversprechend. Die Entwicklung des Gebiets wird allerdings durch (i) mangelnde Übereinstimmung der Ergebnisse verschiedener Forscher, (ii) schlechte Charakterisierung und Herstellung von Suspensionen, (iii) mangelndes theoretisches Verständnis über die verantwortlichen Mechanismen, behindert. Weitere experimentelle Studien und Arbeiten zur konvektiven Wärmeübertragung von Nanofluiden sind erforderlich, um diese Hindernisse zu überwinden. Viele Aspekte, wie die Wärmeleitfähigkeit, die Brownsche Bewegung von Partikeln, die Partikelmigration und die Veränderung der thermophysikalischen Eigenschaften mit der Temperatur und der Zeit (Stabilität), müssen bei der konvektiven Wärmeübertragung mit Nanofluiden sorgfältig berücksichtigt werden.

Die Information über die Wechselwirkung von Nanomaterialien innerhalb des Basisfluids hat eine große Bedeutung für den Einsatz von Nanofluiden in industriellen Anwendungen. Die Agglomeration unter den Partikeln ist aufgrund interaktiver Kräfte ein häufiges Problem, das die Dispersion und die Rheologie von Nanosuspensionen beeinflussen. Der Einfluss der Agglomeration auf die Stabilität von Nanofluiden kann durch die Einführung verschiedener mechanischer und chemischer Techniken zur Verlängerung der Dispersion von suspendierten Partikeln in Flüssigkeiten reduziert werden.[8, 37]

Der entstehende Druckabfall ist einer der wichtigsten Parameter, der die Effizienz der Nanofluidanwendung bestimmt. Druckverlust und Pumpleistung sind eng miteinander verbunden. Nur wenige Eigenschaften haben einen direkten Einfluss auf den Druckverlust eines Kühlmittels oder Heizmediums: Dichte und Viskosität. Es ist zu erwarten, dass Flüssigkeiten mit höherer Dichte und Viskosität einen höheren Druckverlust aufweisen. In [19] und [20] werden die Viskosität von Al_3O_2 -Nanofluiden und ZnO -Nanofluiden auf

Ethylenglykolbasis gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zähigkeit von Nanofluiden deutlich höher als die vom Basisfluid liegt. Somit erhöht sich die erforderliche Pumpenleistung um 25%. In [21] wird die Dichte von verschiedenen Nanofluiden numerisch überprüft. Die berechneten höheren Werte, im Vergleich zum Basisfluid (Wasser) deuten auf eine Erhöhung der Druckverluste hin. Mehrere Studien zeigen, dass der Druckabfall von Nanofluiden signifikant ansteigt. So wird in [34] das thermische Design von kompakten Wärmetauschern mit Nanofluiden untersucht. Die Messungen zeigen, dass der Druckabfall von 4% Al_2O_3 – Wasser Nanofluid fast doppelt so hoch ist wie der vom Basisfluid.

Die höheren Produktionskosten von Nanofluiden gehören zu den Gründen, die ihre Anwendung in der Industrie behindern können. Nanofluiden können entweder einstufig oder zweistufig hergestellt werden [1]. Die beiden Methoden erfordern allerdings anspruchsvolle und teure Ausrüstungen und Techniken. Laut [26-27] gehören die hohen Herstellungskosten von Nanofluiden zu den größten Nachteilen und Hindernisse für ihre breitere Anwendung.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] V. Bianco, O. Manca and S. Nardini. *Heat Transfer Enhancement with Nanofluids*. s.l. : CRC Press, 2011.
- [2] B. Blomert. *VDI-Wärmeatlas*. s.l. : Springer Verlag, 2013.
- [3] R. Issa “Effect of Nanoparticles Size and Concentration on Thermal and Al_2O_3 -Water Nanofluids” *Heat and Mass Transfer*. 2016.
- [4] M. Beck, Y. Yanhui, P. Warriar and A Teja. “The effect of particle size on the thermal conductivity of nanofluids” in *Journal of Nanoparticle Research*. 11(5), 2008, pp. 1129-1136.
- [5] H. Li, W. Yang, Z. Yu, L. Zhao. “The performance of a heat pump using nanofluid ($\text{R}22+\text{TiO}_2$) as the working fluid – an experimental study” in *Energy Procedia* vol 75, 2015, pp. 1838-1843.
- [6] V. Mikkola, S. Puupponen, H. Granbohm and A. Seppälä. “Influence of particle properties on convective heat transfer of nanofluids” in *International Journal of Thermal Sciences*. vol 184, 2017, pp. 187-195.
- [7] N. Putra, Y. Ferdiansyah and N. Iskandar. “Application of nanofluids to a heat pipe liquid-block and the thermoelectric cooling of electronic equipment” in *Experimental Thermal and Fluid Science* vol 35 2011, pp. 1274-1281
- [8] M.R.Sohela, R.Saidurab, M. Sabri, M. Kamalisarvestania, M.M.Elias and A. Ijama. “Investigating the heat transfer performance and thermophysical properties of nanofluids in a circular micro-channel” in *International Communications in Heat and Mass Transfer* vol. 42, 2013, pp. 75-81
- [9] M. Al-Rasheda, G. Dzidob, M. Korpyśb, J. Smolkac and J. Wójcikb. “Investigation on the CPU nanofluid cooling” in *Microelectronics Reliability* vol 63, 2016, pp. 159-165.
- [10] A. Kumar, T. Pradyumna, Ghosh Pradyumna and J. Sarkar “Solar water heating using nanofluids - A comprehensive overview and environmental impact analysis” in *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2013.
- [11] M. Buschmann, R. Azizian, T. Kempe, J. Julia, R. Martinez-Cuenca, B. Sunden, Z. Wu., A. Seppälä and T. Ala-Nissila “Correct interpretation of nanofluid convective heat transfer” in *International Journal of Thermal Sciences*. vol. 129, 2018, pp. 504-531.
- [12] A. Albojamal und K. Vafai. „Analysis of single phase, discrete and mixture models, in predicting nanofluid transport” in *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol 114, 2017, pp. 225-237
- [13] R.Saidura, T.C.Menga, Z.Saidab, M.Hasanuzzamanb, A.Kamyara. “Evaluation of the effect of nanofluid-based absorbers on direct solar collector” in *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol 55 2012, pp. 5899-5907
- [14] R. Bhogare and B. Kothawale “A Review on applications and challenges of Nanofluids as coolant in Automobile Radiator” *International Journal of Scientific and Research Publications* vol 3 2013.
- [15] D. Singh, J. Toutbor and G. Chen “Heavy vehicle systems optimization merit review and peer evaluation” *Annual Report*. 2009.
- [16] W. Nduku. “Ethylene glycol (EG)-based nanofluids as a coolant for automotive radiator” *Asia Pacific Journal on Computational Engineering*. vol 3, 2016.
- [17] M. Vashghani, E. Marzbanrad, E. Marzbanrad and C. Zamani. “Thermal conductivity and viscosity of TiO_2 -engine oil nanofluids” in *International Journal of Nanomechanics Science and Technology* vol 4 2014, pp 145-156.
- [18] F. Ali, K. Aamina, I. Tlili, M. Gohar “Effects of Different Shaped Nanoparticles on the Performance of Engine-Oil and Kerosene-Oil: A generalized Brinkman-Type Fluid model with Non-Singular Kernel” in *Scientific Reports*. vol 8, 2018.
- [19] R.Saidur, T. Meng, Z. Said “Evaluation of the effect of nanofluid-based absorbers on direct solar collector” in *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol 5, 2012, pp 5899-5907.
- [20] JH, Lee, K Hwang, S. Jang, B. Lee, J. Kim, S. Choi “Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al_2O_3 nanoparticle” in *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008.
- [21] J. Routbort, D. Singh, E. Timofeeva, W. Yu and D. France “Pumping power of nanofluids in a flowing system” in *Journal of Nanoparticle Research* vol 13, 2011, pp. 931-937.
- [22] P. Namburu, D. Das, K. Tanguturi and R. Vajjha “Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties” in *International Journal of Thermal Science* vol 49, 2009, pp. 290-302
- [23] W. Xiang-Qi and A. Mujumdar “A review on nanofluids - part I: theoretical and numerical investigations” in *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. vol 25, 2008, pp. 613-630.
- [24] J. Meyer, S. Adio und M. Sharifpur. “The Viscosity of Nanofluids: A Review of the Theoretical, Empirical, and Numerical Models” *Heat Transfer Engineering*. vol 37, 2015, pp 387-421.
- [25] L. Zhou, B. Wang, X. Peng “On the Specific Heat Capacity of CuO Nanofluid” in *Advances in Mechanical Engineering*” 2015.
- [26] J. Lee, I. Mudawar. “Assessment of the effectiveness of nanofluids for singlephase and two-phase heat transfer in micro-channels” *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol 50, 2007, pp. 452-463.
- [27] JH, Lee, K. Hwang, S. Jang, B. Lee, J. Kim, S. Choi and C. Choi “Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al_2O_3 nanoparticles” in *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 51, 2008, pp. 2651-2656
- [28] A. Tiwari, P. Ghosh and J. Sarkar. „Heat transfer and pressure drop characteristics of CeO_2 /water nanofluid in plate heat exchanger” in *Applied Thermal Eng.* vol 57, 2013, pp. 24-32.
- [29] M. Pantzali, A. Mouza and S. Paras. „Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE)” in *Chemical Engineering Science* vol 64, 2009, pp. 3290-3300
- [30] V. Kumara, A. Tiwari and S. Ghosh “Characterization and performance of nanofluids in plate heat exchanger” in *Materials Today: Proceedings* vol 4. 2017, pp. 4070-4048.
- [31] H. Arya, M. Sarafraz, O. Pourmehran, M. Arjomadi “Heat transfer and pressure drop characteristics of MgO nanofluid in a double pipe heat exchanger” in *Heat and Mass Transfer*. vol 55 2019, pp. 1769-1781
- [32] M.Rao, D. Sreeramulu, and D. Asiri. “Experimental Investigation of Heat transfer rate of Nanofluids using a Shell and Tube Heat exchanger” in *Materials Science and Engineering*. 2016.
- [33] E. Favale, G. Colangelo, A. Risi, M. Milanese and D. Laforgia “Experimental test of an innovative high concentration nanofluid solar collector” in *Applied Energy* vol 154, 2015, pp.874-881.
- [34] M.R.Sohela, S.S. Khaleduzzaman, R. Saidur, A. Hepbasli, M.F.M. Sabri and I. Mahbul. „An experimental investigation of heat transfer enhancement of a minichannel heat sink using Al_2O_3 - H_2O nanofluid” in *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol 74, 2014, pp. 164-172.
- [35] W. Duangthongsuk. “Thermal and Hydraulic Performances of Nanofluids Flow in Microchannel Heat Sink with Multiple Zigzag Flow Channels” in *Materials Science and Engineering*. 2017, MATEC Web of Conferences 95, 03011.
- [36] V. Vasu, K. Krishna and A. Kumar. “Heat transfer with nanofluids for electronic cooling” *International Journal Mater Prod Technology* vol 34, 2009.
- [37] S. Ilyas, R. Pendyala and N. Marneni “Preparation, Sedimentation and Agglomeration of Nanofluids” in *Engineering Applications of Nanotechnology* vol 37, 2014, pp. 2011-2021.