

NUOVI FLUIDI TERMOMETTORI: I NANOFLUIDI

Prof. ing. Gianpiero Colangelo*, Prof. ing. Giuseppe Starace,
Prof. ing. Marco Milanese, Prof. ing. Arturo de Risi

Dipartimento di ingegneria dell'innovazione - Università del Salento, Via per Arnesano, I-73100 LECCE

*gianpiero.colangelo@unisalento.it, tel. 0832299440

SOMMARIO

In ambito energetico, i fluidi termovettori rivestono un ruolo chiave nel trasferimento di calore e devono rispondere alle specifiche e alle esigenze peculiari delle applicazioni alle quali sono destinati. Negli ultimi anni, sono state sviluppate tecnologie e materiali innovativi che stanno conducendo a importanti innovazioni scientifiche e tecnologiche per soddisfare le nuove e pressanti esigenze di risparmio energetico e di miglioramento dell'efficienza, attuali in ogni ambito impiantistico.

I nanofluidi, costituiti da una sospensione di nanoparticelle solide ad elevata conducibilità termica all'interno di un fluido termovettore, rappresentano una delle soluzioni più interessanti e promettenti che si stanno affermando nel panorama internazionale con notevoli impatti sia dal punto di vista energetico, sia ambientale. I campi di applicazione sono molteplici e vanno dai trasporti, alle micromachines, ai sistemi elettronici, ai collettori solari, agli impianti per la conversione dell'energia e a molti altri.

LO STATO DELL'ARTE

L'idea di migliorare lo scambio termico nei fluidi termovettori, attraverso la sospensione di particelle solide ad elevata conducibilità termica in un liquido, fu proposta per la prima volta da Maxwell in "A Treatise on Electricity and Magnetism" nel 1881. I nanofluidi sono una nuova e innovativa classe di fluidi termovettori creati disperdendo particelle solide, con diametro inferiore ai 100 nm, in un fluido termovettore tradizionale [1]. Generalmente le particelle solide hanno una conducibilità termica maggiore dei liquidi e, in particolare, le nanoparticelle sono da preferire alle microparticelle perché hanno la caratteristica di rimanere in sospensione nel liquido in quiete per un tempo maggiore e la loro superficie specifica (riferita al volume) è circa 1000 volte maggiore. Quanto minore è la dimensione delle particelle, tanto migliore è la capacità di scambio termico con il fluido. Per questo, le nanoparticelle sono particolarmente idonee per l'impiego in fluidi termovettori. Elevata superficie di scambio e massa ridotta sono due delle caratteristiche chiave che fanno delle nanoparticelle l'additivo idoneo per migliorare lo scambio termico per applicazioni "calde" come per applicazioni "fredde".

Le campagne sperimentali condotte fino a oggi indicano che già con ridotte concentrazioni di nanoparticelle (1-5% in volume), la conducibilità termica dei nanofluidi può essere migliorata di oltre il 20% [2]. Il miglioramento dipende da molteplici fattori come, per esempio, la geometria delle nanoparticelle, la loro dimensione, la concentrazione, le proprietà termofisiche dei materiali ecc. La dimensione ridotta delle nanoparticelle usate nei nanofluidi offre ulteriori vantaggi se il paragone si fa con particelle di maggiori dimensioni.

Le particelle di dimensioni millimetriche o micrometriche sedimentano rapidamente, otturando i canali di deflusso, aumentando la loro corrosione superficiale e causando perdite di carico aggiuntive, che possono tradursi in cadute di pressione notevoli nei condotti. Questi problemi limitano notevolmente l'uso di sospensioni solido-liquido convenzionali. Se paragonate alle tecniche tradizionali esistenti di miglioramento dello scambio termico, i nanofluidi mostrano un notevole potenziale nell'incremento prestazionale in un'ampia varietà di applicazioni, con trascurabili conseguenze sulle perdite di carico nei condotti. Pur avendo grandi potenzialità di impiego, tuttavia, l'uso dei nanofluidi è ancora molto limitato. Al momento esistono solo poche pubblicazioni riportate in letteratura e un ridotto numero di ricercatori coinvolti in questo argomento specifico. Affinché possano

essere sfruttati al meglio nelle applicazioni pratiche, è ancora necessaria una comprensione completa delle performance di miglioramento di scambio termico dei nanofluidi.

È molto complesso definire una teoria consolidata che possa predire il comportamento fisico del flusso di un materiale multicomponente disperso. Un approccio simile risulta impraticabile anche per applicazioni pratiche di nanofluidi per il miglioramento dello scambio termico. Il coefficiente di scambio termico convettivo dei nanofluidi dipende da numerosi fattori termofisici delle nanoparticelle e del fluido base come per esempio la conducibilità termica ecc. Analogamente, bisogna tenere in debito conto modello di flusso, viscosità dei nanofluidi, frazione volumetrica delle particelle solide, dimensioni e forma delle particelle [3,4,5,6,7,8]. Fino ad oggi lo studio e la caratterizzazione del coefficiente di scambio termico convettivo dei nanofluidi rimangono in un campo ancora poco esplorato sia dal punto di vista dell'approccio teorico sia sperimentale.

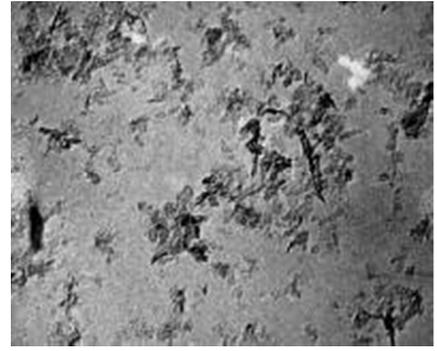
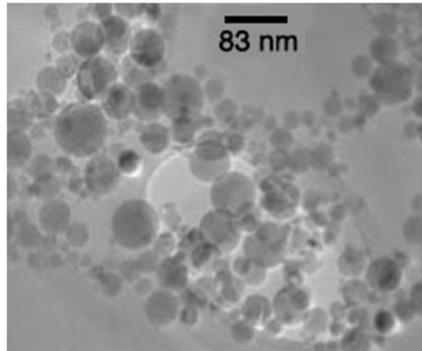
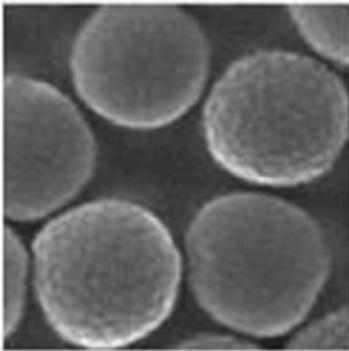
I nanofluidi con una conducibilità termica triplicata rispetto al fluido base possono raddoppiare la capacità di scambio termico. In particolare, le nanoparticelle metalliche possono incrementare lo scambio termico [9, 10] in misura maggiore rispetto a nanoparticelle di ossidi. È stato provato sperimentalmente che aggiungendo solo 0.3% in volume di nanoparticelle di rame a glicole di etilene si riesce ad aumentare la conducibilità termica di circa il 40% [7]. L'aumento della conducibilità termica del fluido si traduce in un aumento dell'efficienza energetica del sistema, in migliori prestazioni e in minori costi di esercizio.

Alcuni fluidi sono in grado di offrire vantaggi sia in termini di resistenza allo scorrimento, sia in termini di capacità di accumulo termico, con la conseguenza di una notevole riduzione delle esigenze di manutenzione di e riparazione degli impianti nei quali sono utilizzati. Grazie alle ridotte dimensioni delle particelle solide, i nanofluidi sono in grado di fluire all'interno di condotti di dimensione ridottissima. Il sottosistema di smaltimento o di assorbimento di energia termica può essere ridotto in ingombri e peso, a tutto vantaggio della riduzione del costo dell'impianto.

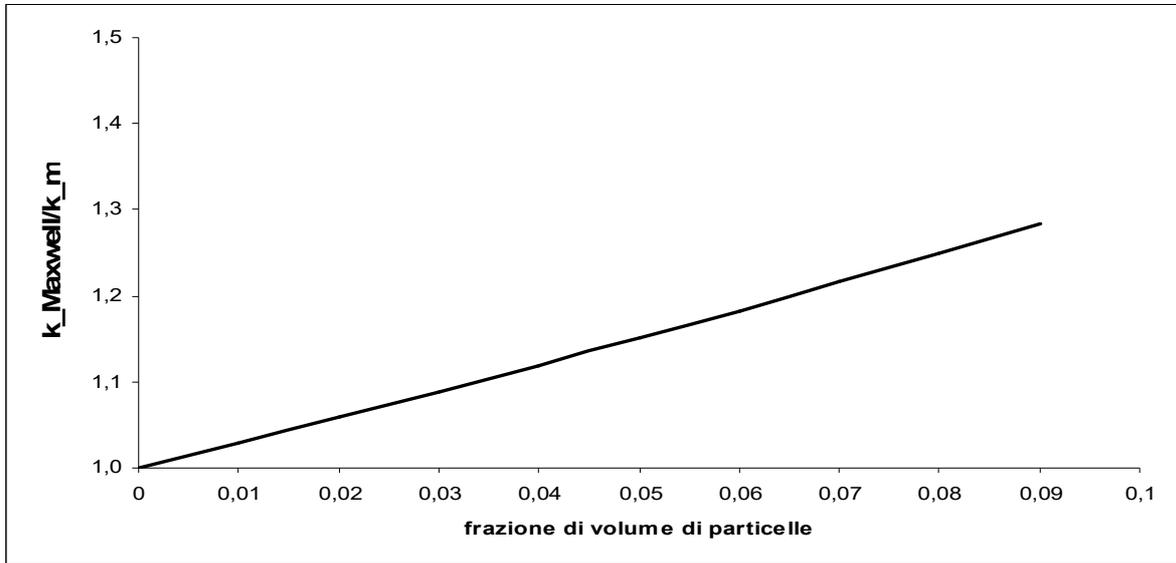
Sono molteplici le teorie e i modelli fisici [11] che descrivono il comportamento termoenergetico dei nanofluidi (per esempio, il modello di Maxwell per particelle sferiche [3]). Tuttavia, essi non sempre concordano con i dati sperimentali disponibili; solitamente i valori sperimentali mostrano valori di conducibilità termica superiori rispetto a quelli previsti applicando le teorie e i modelli classici.



Nanopolveri



Nanoparticelle



Modello di Maxwell per nanofluidi a base di acqua ed Al_2O_3

Negli ultimi anni, i ricercatori hanno suggerito alcuni possibili meccanismi che potessero spiegare l'innalzamento della conducibilità termica dei nanofluidi indicando come l'effetto taglia, il clustering delle nanoparticelle e l'adsorbimento superficiale possano essere le maggiori cause alla base del possibile meccanismo di tale aumento [12, 13]. In particolare, sono state individuate quattro cause di maggiore importanza in questo campo [14], che possono spiegare l'incremento anomalo di conducibilità termica all'interno dei nanofluidi: il moto browniano delle nanoparticelle, la stratificazione a livello molecolare del liquido all'interfaccia liquido/particella, la

natura del trasporto termico nelle nanoparticelle e gli effetti del clustering delle nanoparticelle.

Tutti i modelli finora proposti non hanno dimostrato di essere totalmente soddisfacenti [15, 16, 17] e per questo sono necessari ulteriori campagne sperimentali.

LE APPLICAZIONI

I nanofluidi possono essere usati in un'ampia varietà di applicazioni industriali [18]. Essi possono, ad esempio:

- migliorare le performance di scambio termico degli attuali

- sistemi industriali di riscaldamento e refrigerazione;
- rendere i processi industriali più efficienti e meno onerosi dal punto di vista dei costi;
- migliorare l'efficienza di trasferimento di calore dai collettori solari ai sistemi di accumulo di energia termica all'interno degli impianti di captazione di energia solare.

Trasporti

Nel campo dei trasporti il miglioramento delle proprietà di scambio termico dei fluidi utilizzati nel funzionamento dei veicoli può avere un'enorme ricaduta sulle performance generali dei sistemi, poiché i fluidi di raffreddamento del motore, gli oli, i fluidi delle trasmissioni automatiche e gli altri fluidi sintetici tradizionalmente usati per la trasmissione del calore ad alta temperatura possiedono scarse capacità intrinseche di trasferire calore e questo fattore costituisce una seria limitazione al funzionamento efficiente dei motori.

L'industria dei trasporti, allora, potrebbe beneficiare in misura notevole dell'elevata conducibilità termica offerta dai nanofluidi. Dalla progettazione di motori, pompe, radiatori e altri componenti più piccoli e leggeri deriverebbero veicoli più leggeri, che lavorano a temperature più favorevoli con conseguenti:

- riduzione dei consumi specifici di combustibile,
- maggiore efficienza energetica,
- risparmio di danaro ai consumatori,
- riduzione dei consumi globali di combustibili fossili
- riduzione delle emissioni inquinanti (CO₂, NO_x, particolato, incombusti) [19].

L'industria automobilistica potrebbe allora raggiungere più facilmente i nuovi obiettivi stabiliti dalle normative europee sulle emissioni delle autovetture e sulla protezione dell'ambiente.

Micromachines

I sistemi micro-elettromeccanici (MEMS) hanno bisogno di sistemi di raffreddamento ben calibrati per prevenire i danni causati dal calore prodotto durante il loro funzionamento.

I refrigeranti tradizionali non lavorano in modo appropriato con i MEMS a causa delle loro insufficienti proprietà termofisiche, se confrontate con l'ingente quantitativo di calore che devono smaltire attraverso ridotte superfici di scambio. Inoltre, anche se particelle solide fossero aggiunte a questi refrigeranti per aumentarne la conducibilità termica, essi potrebbero non funzionare in modo adeguato a causa della grandezza delle particelle solide che, se troppo grandi, potrebbero non scorrere facilmente all'interno dei piccolissimi canali di raffreddamento richiesti dai MEMS. Poiché i nanofluidi possono fluire nei microcanali senza causarne l'otturazione, essi appaiono ottimi candidati a costituire fluidi refrigeranti da utilizzare in queste applicazioni. Con il loro utilizzo si potrebbe migliorare il raffreddamento dei MEMS in condizioni critiche di flusso termico, ricorrendo all'utilizzo di una potenza di pompaggio ridotta senza problemi di ostruzione dei microcanali [20].

Sistemi elettronici

La riduzione sempre più spinta delle dimensioni dei componenti elettronici ha causato molti problemi al loro efficiente raffreddamento. Le dimensioni ultrapiùcole dei componenti elettronici, unite all'elevata generazione di potenza termica producono la necessità di rimuovere alti flussi termici.

Per queste ragioni è cresciuta e continua a crescere in questo settore la domanda di refrigeranti ad altissime prestazioni.

Le tecniche tradizionali di aumento delle superfici disperdenti sembrano aver raggiunto il loro limite tecnologico per quanto riguarda l'incremento di potenza dispersa a garanzia dell'esercizio a temperature accettabili di lavoro anche nelle peggiori condizioni ambientali. Migliorare le proprietà termofisiche del fluido termovettore attraverso l'ausilio delle

nanoparticelle potrebbe costituire la giusta risposta a questo problema [20].

Impianti frigoriferi, di riscaldamento e di condizionamento dell'aria

I nanofluidi possono migliorare notevolmente le caratteristiche di scambio termico degli attuali sistemi frigoriferi, di riscaldamento e di condizionamento dell'aria.

In questo ambito si stanno iniziando a considerare diverse idee di principio innovative; una di queste riguarda il pompaggio di un refrigerante dal luogo di produzione del freddo al luogo dove è ospitata l'unità utilizzatrice.

La tecnologia dei nanofluidi potrà rendere questo processo più efficiente dal punto di vista energetico con un miglior ritorno economico [21].

Collettori solari

I nanofluidi possono essere usati come fluidi termovettori nei collettori solari per aumentare l'assorbimento della potenza termica dalla radiazione solare, con lo scopo di raggiungere temperature di esercizio più elevate e di ridurre la portata dei fluidi e la potenza di pompaggio nei circuiti idraulici.

In particolare, l'uso dei nanofluidi potrebbe risultare estremamente vantaggioso nelle applicazioni ad alta temperatura (maggiori di 700 K), dove l'uso dei tradizionali fluidi termovettore non è proponibile.

L'uso dei nanofluidi, concepiti per migliorare le proprietà termiche dei fluidi capaci di lavorare ad alte temperature, costituisce uno degli obiettivi di ricerca più attuali [22, 23].

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Xuan, Yimin; Li, Qiang, "Heat transfer enhancement of nanofluids", International Journal of Heat and Fluid Flow Volume: 21, Issue: 1, February, 2000, pp. 58-64
2. Choi et al, Appl. Phys. Lett., Vol. 79, No. 14, 1 October 2001.
3. Choi, S.U.S. and W. Yu. "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model" Journal of Nanoparticle Research 5: 167-171, 2003.
4. M. LOMASCOLO, G. COLANGELO, M. MILANESE, A. DE RISI, "Review of heat transfer in nanofluids: Conductive, convective and radiative experimental results", Renewable and Sustainable Energy Reviews 43 (2015), Pages 1182-1198, ISSN: 1364-0321, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.086>)
5. Ronggui Yang and Gang Chen, "Two Dimensional Nanoscale Heat Conduction Using Ballistic-Diffusive Equations", Proc. International Mechanical Engineering Conference and Exhibition, New York, Nov. 2001.
6. Xue, Qing-Zhong, "Model for effective thermal conductivity of nanofluids", Physics Letters A Volume: 307, Issue: 5-6, February 10, 2003, pp. 313-317.
7. Zhou, D.W., "Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitation", International Journal of Heat and Mass Transfer Volume: 47, Issue: 14-16, July, 2004, pp. 3109-3117.
8. Xue, Q.; Xu, Wen-Mei, "A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells", Materials Chemistry and Physics Volume: 90, Issue: 2-3, April 15, 2005, pp. 298-301.
9. Yu, W; Choi, S.U.S., "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Hamilton-Crosser model", Journal Of Nanoparticle Research Volume: 6, Issue: 4, August 2004, pp. 355 - 361.
10. Roy, Gilles; Nguyen, Cong Tam; Lajoie, Paul-René, "Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids", Superlattices and Microstructures Volume: 35, Issue: 3-6, March - June, 2004, pp. 497-511.

11. Keblinski, P.; Phillpot, S.R.; Choi, S.U.S.; Eastman, J.A., "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)", *International Journal of Heat and Mass Transfer* Volume: 45, Issue: 4, February, 2002, pp. 855-863.
12. M. MILANESE, F. IACOBAZZI, G. COLANGELO, A. DE RISI, "An investigation of layering phenomenon at the liquid-solid interface in Cu and CuO based nanofluids", (2016) *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 103, pp. 564-571, ISSN: 0017-9310, (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.082>)
13. F. IACOBAZZI, M. MILANESE, G. COLANGELO, M. LOMASCOLO, A. DE RISI, "An explanation of the Al₂O₃ nanofluid thermal conductivity based on the phonon theory of liquid", (2016) *Energy*, 116, pp. 786-794, ISSN: 0360-5442, (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.027>).
14. Koo, Junemoo; Kleinstreuer, Clement, "A new thermal conductivity model for nanofluids", *Journal of Nanoparticle Research* Volume: 6, Issue: 6, December 2004, pp. 577 – 588.
15. Wen, Dongsheng; Ding, Yulong, "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer* Volume: 47, Issue: 24, November, 2004, pp. 5181-5188.
16. Wang, Bu-Xuan; Zhou, Le-Ping; Peng, Xiao-Feng, "A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles", *International Journal of Heat and Mass Transfer* Volume: 46, Issue: 14, July, 2003, pp. 2665-2672
17. Liu, W.K.; Karpov, E.G.; Zhang, S.; Park, H.S., "An introduction to computational nanomechanics and materials", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Volume: 193, Issue: 17-20, May 7, 2004, pp. 1529-1578.
18. G. Colangelo, E. Favale, M. Milanese, G. Starace, A. de Risi, "Experimental Measurements of Al₂O₃ and CuO Nanofluids Interaction with Microwaves.", (2017) *Journal of Energy Engineering*, vol. 04016045, ISSN: 0733-9402, (DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000400).
19. F. Micali, M. Milanese, G. Colangelo, A. de Risi, "Experimental investigation on 4-strokes biodiesel engine cooling system based on nanofluid", (2018) *Renewable Energy*, 125, pp. 319-326. ISSN: 0960-1481, (DOI: 10.1016/j.renene.2018.02.110).
20. G. Colangelo, E. Favale, M. Milanese, A. de Risi, D. Laforgia, "Cooling of electronic devices: Nanofluids contribution", (2017) *Applied Thermal Engineering*, 127, pp. 421-435, ISSN: 13594311, (DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.042).
21. M. Milanese, A. de Risi, G. Colangelo, "Energy simulation of a nanofluid solar cooling system in Italy", (2018) *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 172(1), pp. 32-39, ISSN: 14784629 (DOI: 10.1680/jensu.16.00027).
22. G. Colangelo, E. Favale, A. de Risi, D. Laforgia, "A new solution for reduced sedimentation flat panel solar thermal collector using nanofluids", *Applied Energy* 111 (2013), p. 80-93, ISSN: 0306-2619, Elsevier Science. (doi: 10.1016/j.apenergy.2013.04.069)
23. G. Colangelo, E. Favale, A. de Risi, G. Starace, D. Laforgia, "Un nuovo pannello solare termico a nanofluidi", *Atti del 66 Congresso Nazionale ATI*, dal 5 - 9 Settembre 2011, Università della Calabria - Rende (Cosenza), ISBN: 978-88-95267-11-1, Barcello Editore (Italy).