



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI
INDUSTRIALI

Laurea Triennale in Ingegneria Meccatronica

ELABORATO FINALE

Analisi del processo di ebollizione di nanofluidi
su superfici piane

Relatore : Prof. Simone Mancin

Correlatore : Dott.ssa Giulia Righetti

Laureando : Nicola Mosele

Matricola : 1045933

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

Indice

Sommario	1
CAPITOLO 1	3
1.1 Introduzione	3
1.2 Nanofluidi.....	3
1.2.1 Metodi di produzione	6
1.2.2 Problematiche relative all'utilizzo dei nanofluidi	7
1.2.3 Applicazioni dei nanofluidi	8
1.3 Parametri che influenzano l'ebollizione di un nanofluido.....	9
1.3.1 Flusso critico di calore	9
1.3.2 Coefficiente di scambio termico.....	9
CAPITOLO 2	11
2.1 Stato dell'arte	11
CAPITOLO 3	17
3.1 Analisi CHF.....	17
3.2 Analisi CHF in relazione ai parametri di interesse.....	20
3.2.5 Analisi base fluida	23
3.2.6 Analisi concentrazione	23
3.2.7 Analisi tipo di particella	23
CAPITOLO 4	25
4.1 Analisi <i>boiling after boiling</i>	25
4.2 Parametri che vengono influenzati dal <i>boiling after boiling</i>	29
CAPITOLO 5	39
NOMENCLATURA	41
BIBLIOGRAFIA	43

Sommario

In questo elaborato sono descritti i nanofluidi, nuova frontiera del raffreddamento monofase e bifase. In particolare, si è analizzato il processo di ebollizione dei nanofluidi in liquido stagnante. Si è cercato di andare a valutare e comprendere cosa sono i nanofluidi e quali sono le loro caratteristiche principali. Poi analizzando diversi lavori di scienziati si è studiato l'effetto dei nanofluidi sul flusso termico critico (CHF) e si è cercato di analizzare i parametri che maggiormente ne influenzano il limite massimo. Successivamente si è studiato l'effetto della deposizione che si ha durante l'ebollizione del nanofluido sulla superficie del riscaldatore cercando di capire se questa è un vantaggio o meno nell'ambito di utilizzo del nanofluido.

CAPITOLO 1

1.1 Introduzione

Oggi più che mai, il raffreddamento è una vera e propria necessità nelle diverse tecnologie industriali a causa degli elevati carichi termici generati sia a livello microscopico (processori di computer) sia a livello macroscopico (motori di automobili). Comunque, i fluidi normalmente utilizzati nel raffreddamento, come aria, acqua, glicole etilenico e olio presentano delle basse conducibilità termiche se confrontate con quelle dei solidi. Lo studio finalizzato ad aumentare le basse conduttività termiche dei liquidi mediante l'aggiunta di particelle solide iniziò più di un secolo fa, quando il grande scienziato James Clerk Maxwell sviluppò un modello teorico della conduttività elettrica di sistemi eterogenei di particelle solide. Da quel momento, il modello di Maxwell è stato applicato per studiare la conduttività termica di miscele di particelle solide e liquidi. È necessario dire che tutti questi studi sono stati limitati a particelle di dimensioni millimetriche e micrometriche. Il maggior problema nell'uso di particelle micrometriche per modificare le caratteristiche di scambio termico dei liquidi è legato al fatto che queste si depositano rapidamente; inoltre presentano anche degli effetti secondari come: abrasione, otturazione dei canali ed elevate perdite di carico. Per ottenere dei miglioramenti apprezzabili della conducibilità termica delle sospensioni si devono introdurre elevate concentrazioni di particelle. Questi problemi hanno bloccato l'utilizzo delle normali sospensioni solido-liquide come fluidi termovettori. Nonostante gli enormi sforzi perpetrati, le barriere tecnologiche finora descritte sono rimaste tali per più di 100 anni. Fortunatamente, le moderne tecnologie possono produrre particelle metalliche e non-metalliche di dimensione nanometrica.

1.2 Nanofluidi

I materiali nanometrici presentano delle proprietà meccaniche, ottiche, elettriche, magnetiche e termiche che possono ritenersi uniche. I nanofluidi sono una nuova classe di fluidi termovettori che si basa sulle nanotecnologie e sono ottenuti disperdendo e stabilizzando delle nanoparticelle con dimensioni tipiche dell'ordine di 10 nm in tradizionali fluidi termovettori. Nanofluidi (dall'anglosassone Nanofluids: Nanoparticle fluid suspensions) è il nome coniato da Choi (1995) per descrivere questa nuova classe di fluidi termovettori sviluppati con le nanotecnologie che esibisce delle proprietà termiche superiori a quelle dei fluidi di base o a quelle delle convenzionali sospensioni di particelle in liquidi. L'obiettivo dei nanofluidi è di raggiungere le più elevate proprietà termiche disperdendo nel fluido base, in maniera uniforme e stabile, la più piccola concentrazione

(preferibilmente <1%) di nanoparticelle (preferibilmente <10 nm). Per raggiungere questo obiettivo è fondamentale comprendere come le nanoparticelle migliorano le proprietà termiche dei liquidi. Da quando Choi ha introdotto il nuovo concetto di nanofluidi nella primavera del 1993, molti scienziati hanno raggiunto importanti scoperte scientifiche riguardanti inaspettate proprietà termiche dei nanofluidi, ma anche hanno sviluppato dei modelli per nanofluidi e identificato delle inusuali opportunità di sviluppare i futuri fluidi termovettori per il raffreddamento di diverse applicazioni, dai computer agli impianti nucleari, proponendo nuove interpretazioni dei motivi per i quali si verificano questi miglioramenti.

Molte combinazioni di nanoparticelle e fluidi base possono dare origine a diversi nanofluidi. Alcune particelle nanometriche possono essere:

- Ossidi ceramici – Al_2O_3 , CuO
- Carburi metallici– SiC
- Nitruri – AlN , SiN
- Metalli – Al , Cu , Au , Ag
- Non-metalli – Grafite e nanotubi in carbonio (CNT)
- Layered – $\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Cu} + \text{C}$
- PCM – S/S
- Diamante

Altre nanoparticelle per particolari applicazioni mentre i fluidi base includono:

- Acqua
- Glicoli etilenici o tri-etilenici e altri fluidi
- Oli e lubrificanti
- Bio-fluidi
- Soluzioni polimeriche
- Altri fluidi comuni

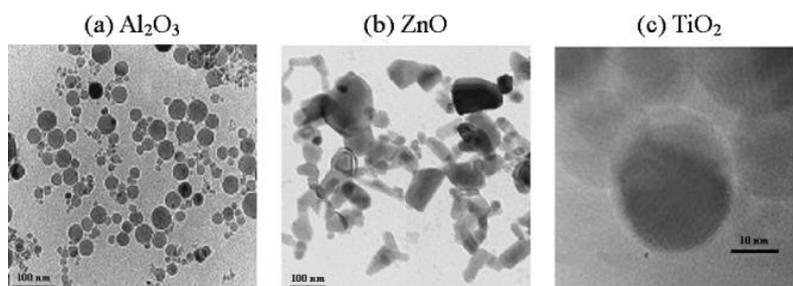


Figura 1: Alcuni dei nanofluidi più comuni

Nanofluidi particolari sono i CNT che vengono descritti qui di seguito:

nel 1985 il chimico statunitense Richard E. Smalley ha scoperto che, in particolari situazioni, gli atomi di carbonio compongono delle strutture ordinate di forma sferica, i fullereni. La struttura, dopo un successivo *rilassamento*, tende ad arrotolarsi su sé stessa, ottenendo la tipica struttura cilindrica: questi sono i nanotubi di carbonio.

Esistono vari nanotubi, a grandi linee si possono suddividere in due tipi:

- nanotubo a parete singola o SWCNT (*Single-Walled Carbon NanoTube*): costituito da un singolo foglio grafítico avvolto su sé stesso;
- nanotubo a parete multipla o MWCNT (*Multi-Walled Carbon NanoTube*): formato da più fogli avvolti coassialmente uno sull'altro.

Il corpo del nanotubo è formato da soli esagoni, mentre le strutture di chiusura sono formate da esagoni e pentagoni. Proprio per questa conformazione di esagoni e pentagoni, i nanotubi presentano spesso dei difetti strutturali o delle imperfezioni che deformano il cilindro. Il diametro di un nanotubo è compreso tra un minimo di 0,7 nm e un massimo di 10 nm. L'elevatissimo rapporto tra lunghezza e diametro (nell'ordine di 10^4) consente di considerarli come delle nanostrutture virtualmente monodimensionali e conferisce a queste molecole delle proprietà veramente peculiari (Figura 2).

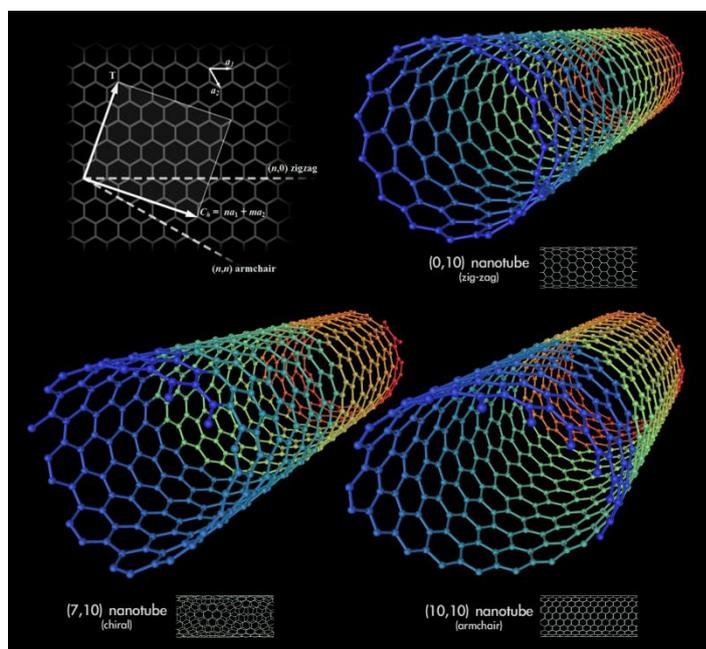


Figura 2: Esempio di struttura di nano tubi

1.2.1 Metodi di produzione

Ci sono due metodi principali per preparare i nanofluidi: “two-step” (due-stadi) e “one-step” (uno-stadio). Il metodo “two-step” è quello più utilizzato: le nanoparticelle, nanofibre, nanotubi o altri nano materiali usati da questo metodo sono dapprima prodotti come polveri attraverso dei metodi chimici o fisici (firststep). Successivamente, le polveri nanometriche saranno disperse nel fluido mediante agitazione magnetica, ad ultrasuoni, miscelamento ad alto-sforzo, omogeneizzazione e macinazione. Il metodo “two-step” è quello più economico per produrre nanofluidi in larga scala, perché i processi di sintesi di nanopolveri sono già stati industrializzati. Le nanoparticelle presentano un’elevata attitudine ad aggregarsi per effetto dell’elevata superficie di contatto e per le loro caratteristiche chimiche. È quindi molto difficile produrre dei nanofluidi stabili, per questo, nuove tecniche sono state sviluppate, tra cui il metodo “onestep” (Figura 3). Il processo denominato “one-step” consiste nella simultanea produzione e dispersione delle particelle nel fluido. In questo metodo, i processi di deumidificazione, immagazzinamento, trasporto e dispersione delle nanoparticelle sono evitati; quindi anche l’agglomerazione delle nanoparticelle è minimizzata e la stabilità del fluido è migliorata. Il metodo “one-step” permette di preparare delle dispersioni stabili e uniformi di nanoparticelle. Sfortunatamente, il processo fisico “one-step” non può sintetizzare nanofluidi in larga scala ed è anche molto costoso; per questo motivo si sta rapidamente sviluppando, assieme ad altre tecniche, un metodo “one-step” alternativo (chimico).

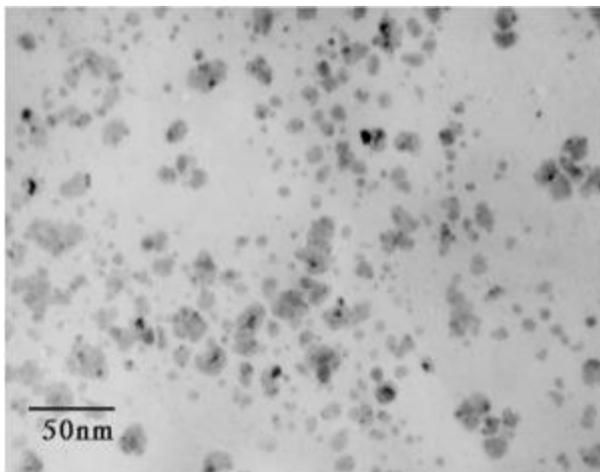


Figura 3: Esempio di nanoparticelle di rame prodotte con evaporazione diretta in glicole etilenico, metodo “one-step”

1.2.2 Problematiche relative all'utilizzo dei nanofluidi

Uno dei principali problemi legati ai nanofluidi è la stabilità della sospensione delle nanoparticelle. L'agglomerazione delle nanoparticelle comporta dei depositi e l'otturazione dei microcanali e fa diminuire la conducibilità termica dei nanofluidi. Una soluzione economica per migliorare la stabilità delle soluzioni di nanofluidi è rappresentata dall'uso dei surfattanti. Questi surfattanti sono agenti chimici di vario genere, come gruppi polari idrofilici, di solito impiegati per aumentare il contatto fra i due materiali, cioè la loro bagnabilità. La scelta del giusto surfattante per un dato nanofluido ha un ruolo chiave nel suo impiego. Anche se negli ultimi dieci anni la ricerca sui nanofluidi ha visto una grande quantità di lavori sperimentali, essa è ancora in una fase iniziale e ci sono molti argomenti aperti, tra i quali: lo scarso accordo fra i risultati sperimentali ottenuti in differenti laboratori e la mancanza di una conoscenza teorica sui meccanismi responsabili dei cambiamenti delle proprietà nei nanofluidi. Ci sono, infatti, molte importanti variabili e problemi legati alla produzione e all'uso dei nanofluidi, che possono avere delle responsabilità sulle differenze riportate dai dati sperimentali. Tipo di nanoparticella, grandezza, forma e distribuzione sono proprietà importanti ma non facilmente misurabili e, molte volte, non ben definite o non riportate nelle pubblicazioni. Il tipo di fluido base utilizzato, il metodo di produzione del nanofluido, l'uso dei surfattanti e degli stabilizzanti, e dei correttori di PH, ecc. sono altre fondamentali informazioni. Due campioni di nanofluido con tutti i parametri uguali ma differenti quantità e tipo di surfattanti e/o correttori di pH utilizzati, possono esibire differenti proprietà termofisiche e termo-fluido-dinamiche. Questi e altri fattori non conosciuti possono spiegare i risultati anomali e differenti ottenuti dai diversi ricercatori. Da quando è stato concepito il concetto di nanofluido, poco più di dieci anni fa, i potenziali dei nano fluidi nelle applicazioni dello scambio termico hanno attratto sempre di più l'attenzione degli studiosi. Nanofluidi con Al_2O_3 e con nanoparticelle di Cu, CNT, mostrano di aumentare la conduttività termica dei fluidi base rendendoli interessanti soluzioni nel controllo termico di diversi sistemi.

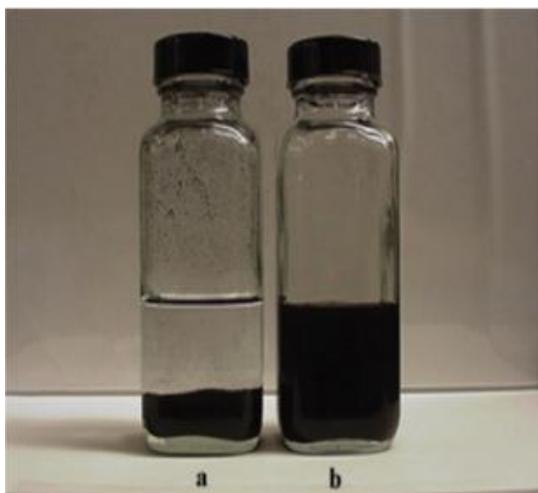


Figura 4: Nanofluidi contenenti Nano-Tubi di Carbonio (CNT) con e senza surfattanti

1.2.3 Applicazioni dei nanofluidi

Guardando alle possibili applicazioni dei nanofluidi, si apre un vasto ventaglio di possibilità: trasporto (raffreddamento dei motori/controllo termico dei veicoli), raffreddamento di componenti elettronici, difesa e spazio, raffreddamento di impianti nucleari, scambiatori di calore, biomedicine e altre applicazioni biomedicali, tubi di calore, celle a combustibile, riscaldamento solare, chillers, refrigeratori domestici, perforazione, lubrificazione, accumulo termico, raffreddamento di compressori mediante l' utilizzo di nano-oli e molte altre.

Solo per dare alcuni esempi delle possibili applicazioni: i nanofluidi hanno dei grandi potenziali nel settore dei trasporti, per migliorare il raffreddamento dei motori di grossa cilindrata aumentandone l'efficienza, diminuendone il peso e riducendo la complessità dei sistemi di controllo termico. Secondo diversi studi scientifici, l'applicazione dei nanofluidi in diversi sistemi di raffreddamento industriale porterà a grandi risparmi e riduzioni delle emissioni. Per l'industria americana, la sostituzione dei sistemi di raffreddamento e riscaldamento ad acqua con quelli a nanofluidi offre un potenziale risparmio di 1 milione di milioni di Btu di energia. Dato che i nanofluidi mostrano anche delle interessanti proprietà durante lo scambio termico bifase, possono venire impiegati anche negli impianti nucleari. Il MIT (Massachusetts Institute of Technology) ha istituito il centro interdisciplinare di ricerca sui nanofluidi per applicazioni nucleari; l'uso dei nanofluidi che presentano un flusso critico almeno il 32% superiore a quello del fluido base, potrebbe portare ad un incremento di circa il 20% della capacità di un impianto esistente senza nessun cambiamento delle caratteristiche tecniche del reattore e senza ridurre i requisiti di sicurezza sul flusso termico critico. Inoltre, i fluidi magnetici sono degli speciali nanofluidi che si servono delle proprietà magnetiche delle particelle disperse nel fluido base. Questi particolari nanofluidi possono essere utilizzati nelle tenute rotanti che lavorano senza manutenzione e con bassissime perdite in un grande campo di condizioni operative. Infine, alcuni tipi speciali di nanoparticelle presentano delle particolari proprietà antibatteriche o di rilascio di medicine, questo fa sì che alcuni nanofluidi che le contengono possono mostrare delle interessantissime proprietà biomedicali. Dopo questa breve descrizione dei nanofluidi, possiamo concludere che questa nuova classe di fluidi mostra delle enormi potenzialità e un grande ventaglio di possibili applicazioni, ma devono essere risolti molti problemi prima che i nanofluidi possano essere utilizzati come fluidi operativi.

1.3 Parametri che influenzano l'ebollizione di un nanofluido

Grandezze che caratterizzano un nano fluido sono, oltre al tipo di nano particella, concentrazione ecc, il coefficiente di scambio termico (HTC) e il flusso di calore scambiato massimo estratto dal nano fluido (CHF).

1.3.1 Flusso critico di calore

Il flusso di calore critico (CHF) descrive il limite termico di un fenomeno in cui si verifica un cambiamento di fase durante il riscaldamento (ad esempio bolle formate su una superficie metallica utilizzata per riscaldare l'acqua), che diminuisce improvvisamente l'efficienza del trasferimento di calore, provocando così il surriscaldamento localizzato della superficie riscaldante.

Quando il liquido refrigerante subisce un cambiamento di fase dovuto all'assorbimento di calore da una superficie solida riscaldata, si verifica un più alto tasso di trasferimento. Il trasferimento di calore più efficace dalla superficie riscaldata (sotto forma di calore di vaporizzazione più calore sensibile) ed i movimenti delle bolle (bubble-driven turbolenza e convezione) porta ad una rapida miscelazione del fluido. Pertanto, il trasferimento di calore in ebollizione ha svolto un ruolo importante nei processi industriali, a livello macroscopico come trasferimento di calore tra scambiatori di centrali nucleari, e a livello microscopico in dispositivi per il raffreddamento di chip elettronici. L'uso del processo di ebollizione è limitato da una condizione chiamata flusso di calore critico (CHF). Il problema più grave è che la limitazione di ebollizione può essere direttamente collegata alla bruciatura fisica dei materiali di una superficie riscaldata a causa del trasferimento di calore improvvisamente inefficiente attraverso uno strato di vapore formatosi sulla superficie riscaldata.

Di conseguenza, il verificarsi del CHF è accompagnato da un aumento eccessivo della temperatura superficiale di un sistema termicamente flusso controllato. Ciò può essere spiegato con la legge del raffreddamento di Newton:

$$q = h * (T_w - T_f) \quad (1)$$

1.3.2 Coefficiente di scambio termico

Il coefficiente di scambio termico è l'espressione quantitativa dell'attitudine di un conduttore termico ad essere percorso da un flusso termico, ad esempio per mezzo di scambio convettivo o nel cambiamento di fase all'interfaccia tra un fluido e un solido. L'espressione che definisce il coefficiente di scambio termico è la seguente:

$$h = \frac{Q}{A * \Delta T * \Delta t} = \frac{q}{A * \Delta T} \quad (2)$$

Il coefficiente di scambio termico è anche definito come l'inverso della resistenza termica.

E' comune esperienza che, riscaldando un liquido in un recipiente posto in contatto con una sorgente di calore, si manifesti in determinate circostanze il fenomeno noto come ebollizione. Si tratta di un cambiamento di fase liquido-vapore che interessa la massa del liquido e non soltanto la sua superficie libera, ovvero quando il fluido evapora. L'ebollizione inizia quando la temperatura della superficie del recipiente, che contiene il fluido, supera quella di saturazione del liquido che la lambisce. Se il liquido è inizialmente in quiete i moti prodotti nella massa sono esclusivamente da attribuirsi al processo stesso, che va sotto il nome di "pool boiling" o, in italiano, ebollizione in liquido stagnante.

CAPITOLO 2

2.1 Stato dell'arte

In letteratura esistono attualmente una moltitudine di articoli e ricerche riguardanti lo studio dei nanofluidi. Da osservare quindi che molti scienziati e ricercatori si sono cimentati nell'analisi di queste sostanze senza però arrivare ad una conclusione unanime. Infatti ogni ricerca riporta risultati diversi dall'altra senza quindi dare una valutazione e spiegazione specifica a questo fenomeno. Concentrandosi su alcuni articoli sperimentali e di analisi dello stato dell'arte si cerca dunque di raggruppare e confrontare queste ricerche utilizzando come metro di confronto alcune tra le voci in comune presenti nei lavori stessi. Nei seguenti articoli si analizzano situazioni in cui si hanno i riscaldatori con superfici piane ma di forma generica e nanofluido che lambisce la superficie del riscaldatore. Ogni articolo analizza un esperimento e possiamo raggruppare gli articoli secondo la seguente Tabella 1:

Tabella 1: Tabella riscaldatore - nanofluido

Autore (anno)	Forma riscaldatore	Dimensioni riscaldatore	Fluido	Tipo particella
Ahn and Kim (2013)	piano, cilindrica	d = 10 mm	acqua	Al ₂ O ₃
Ahn et al. (2010)	rettangolare	20x25x0.7 mm	acqua	non specificate
Amiri et al. (2014)	cilindrica	d = 15 mm, l = 75 mm	acqua	3 tipi: CNT-Ag, CNT-Cys, CNT puro + surfattanti (GA) 0.1%wt
Balcilar et al.(2012)	cilindrica	non specificate	acqua	TiO ₂
Bang and Chang (2005)	rettangolare	4x100x1.9 mm	acqua	Al ₂ O ₃

Chopkar et al. (2008)	cilindrica	d = 50.8 mm, l = 110 mm	acqua + idrossido di tetrametilammoni o (surfattante)	ZrO ₂
Cieslinski and Kaczmarczyk (2011)	recipiente cubico + tubo orizzontale	150x150x250 mm, d = 10 mm	acqua	CuO e Al ₂ O ₃
Das et al. (2013)	rettangolare	non specificate	acqua	TiO ₂
Das et al. (2003)	cilindrica	d = 20 mm	acqua	Al ₂ O ₃
Fokin et al. (2009)	non specificata	non specificate	acqua	ZrO ₂
Gerardi et al. (2011)	non specificata	30x10 mm ²	acqua	diamante e silicio
Harish and Sajith (2011)	2 dischi di alluminio	area 314 mm ²	acqua	Al ₂ O ₃
Hedge et al. (2012)	recipiente di acciaio inox SS316 + sezione cilindrica	recipiente : 80x200 mm, sezione di test cilindrica : d = 6 mm, h = 17 mm	acqua	CuO
Hedge et al. (2012)	recipiente di acciaio inox SS316 + sezione cilindrica	recipiente : 80x200 mm, sezione di test cilindrica : d = 6 mm, h = 17 mm	acqua	Al ₂ O ₃
Hedge et al. (2012)	recipiente di acciaio inox SS316 + sezione cilindrica	recipiente : 80x200 mm, sezione di test cilindrica : d = 6 mm, h = 17 mm	acqua	CuO

Hedge et al. (2013)	recipiente di acciaio inox SS316 + sezione cilindrica	recipiente : 80x200 mm, sezione di test cilindrica : d = 6 mm, h = 17 mm	acqua	CuO
Jung et al. (2012)	piastra di rame	10x10x3 mm	acqua	Al ₂ O ₃ + alcool polivinilico (PVA) come stabilizzante
Kathiravan et al. (2010)	piastra di acciaio inox	30x30 mm, spessore 0.44mm	acqua/ acqua + surfattanti	CuO
Kim et al. (2010)	piastra di silicio rettangolare	25 x 20 mm	acqua	ZnO
Kim et al. (2013)	non specificata	10x10x3 mm	acqua	Al ₂ O ₃
Kim (2014)	circolare	d = 9 mm	acqua	CuO
Kole and Dey (2012)	vasca + blocco cilindrico di rame	vasca : 75x75x200 mm, cilindro : d = 15 mm	glicole etilenico	ZnO
Krishna et al. (2011)	piastra circolare di rame	d = 25 mm	acqua	CuO
Kwark et al. (2010)	blocco in rame	1x1x0.3 cm	acqua	Al ₂ O ₃ , CuO, diamante
Kwark et al. (2010)B	blocco in rame	1x1x0.3 cm	acqua	Al ₂ O ₃ , CuO, diamante
Kwark et al. (2010)C	blocco in rame	1x1x0.3 cm	etanolo e acqua	Al ₂ O ₃
Kwark et al. (2011)	blocco in rame	1x1x0.3 cm	etanolo e acqua	Al ₂ O ₃ , H ₃ BO ₃ (acido borico) e

				NaCl
Lee and Chang (2012)	vasca + 2 nastri	vasca : 200x120x200 mm, nastro : 50x10x0.7 mm	acqua	Al ₂ O ₃ , CNT
Liu et al. (2004)	vasca cilindrica + riscaldatore cilindrico	vasca : d = 65mm, h = 220 mm, riscaldatore : d = 10 mm, l = 180 mm	acqua	Fe ₃ O ₄ + surfattanti
Mori et al. (2015)	piastra circolare	d=10, 30 e 50 mm	acqua	TiO ₂
Mourgues et al. (2013)	Cilindrica	d = 15 mm, h = 500 micro	acqua	ZnO
Okawa et al. (2012)	vasca cilindrica + riscaldatore cilindrico	vasca : d = 160 mm, h = 200 mm, heater : d = 20 mm	acqua	TiO ₂
Park et al. (2011)	non specificata	9.53x9.53 mm	acqua + DISPERBYK 184	MWCNT
Raveshi et al. (2013)	non specificata	d = 40 mm	acqua + glicole etilico 50-50	Al ₂ O ₃ + sodio dodecilbenzene (SDBS) come dispersante
Sakashita (2012)	cilindrica	d = 12 mm	acqua + surfattanti	TiO ₂ + dodecil solfato di sodio SDS (surfattante)
Sarafraz and Hormozi (2014)	cilindrica	d = 21 mm, l = 350 mm	glicole etilico + dispersante SDS 0.1%	Al ₂ O ₃

Seo et al. (2015)	cilindrica	d = 10 mm, l = 51 mm	acqua	non specificata
Shahmoradi et al. (2013)	circolare piana	d = 38 mm	acqua distillata	Al ₂ O ₃
Shoghl et al. (2013)	non specificata	d = 10.67 mm, l = 99.1 mm	acqua	CuO, ZnO, surfattanti (SDS)
Suriyawong and Wongweises (2010)	circolare	non specificate	acqua	TiO ₂
Truong et al. (2010)	rettangolare	7x0.5 cm	acqua	diamante, ZnO, Al ₂ O ₃
Venkatachalapathy et al. (2013)	rettangolare	10x10x15 mm	acqua	Al ₂ O ₃
Wen (2012)	rettangolare	20x20x10 mm	acqua	Al ₂ O ₃
Wen et al. (2011)	rettangolare	20x20x10 mm	acqua	alfa- Al ₂ O ₃
White et al. (2011)	disco acciaio inox	d = 1 pollice	acqua	ZnO
White et al. (2010)	disco ferro cromo + lamelle in acciaio inox	disco : d = 82.6 mm, lamelle : 12.7 x 25,4 x 3.2 mm	acqua (senza surfattanti)	ZnO
Xue et al. (2012)	non specificata	d = 12 mm, d = 120 mm e h = 135 mm	Gum Arabic+ Water	MWCNT

Si può notare come siano stati adottati solo alcuni tipi di nano fluidi e che la maggior parte degli scienziati abbia utilizzato acqua come fluido base, tuttavia anche il glicole etilenico è stato utilizzato. Oltre alle famiglie di nano fluidi più comuni troviamo anche quelle denominate CNT.

Dai dati forniti dalla tabella possiamo ora ad analizzare più nel dettaglio quali sono le grandezze che permettono di studiare fino in fondo il comportamento dei nanofluidi.

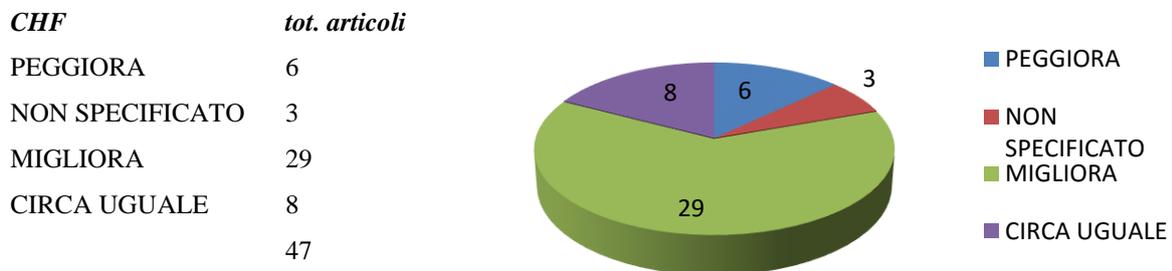
CAPITOLO 3

3.1 Analisi CHF

Quello che si va ad analizzare in questa parte è il parametro più di interesse relativo a questo studio ovvero il CHF.

Analizzando gli articoli è emerso che il CHF può migliorare o peggiorare in base all'utilizzo o meno del nanofluido. In particolare nel grafico vengono espressi i valori precisi:

Figura 5: Grafico riassuntivo CHF



Andiamo ad analizzare quali sono i motivi di miglioramento e peggioramento del CHF, premesso che non tutti gli autori ne dichiarano il motivo. Nella maggior parte degli articoli si ha un miglioramento del CHF e questo viene confermato da diversi autori in cui si nota che il CHF migliora grazie al deposito di nanoparticelle che si crea sulla superficie del riscaldatore. In particolare il deposito ha influenza su diversi parametri che influenzano il comportamento del nanofluido:

- Hedge et al. (2012) dicono che il CHF migliora grazie all'aumento di temperatura dovuta al deposito;
- Mourgues et al. (2013) dicono che il CHF aumenta in quanto aumentano le proprietà della superficie (porosità, bagnabilità, rugosità) dovute al deposito;
- Park et al. (2011) dicono che il CHF migliora con l'aumento di concentrazione di CNT;

- Ahn and Kim (2013) dicono che il CHF è proporzionale all'area della superficie del riscaldatore e aumenta dopo che c'è stato deposito;
- Hedge et al. (2012) dicono che il CHF migliora aumentando la concentrazione delle nanoparticelle all'interno del nanofluido;
- Hedge et al. (2013) dicono che il CHF migliora con l'aumento della temperatura della superficie, la quale varia in base alla quantità di deposito che si è formato;
- Kathiravan et al. (2010) dicono che il CHF migliora in relazione della struttura microscopica e topografia della superficie del riscaldatore i quali miglioramenti sono generati dalla formazione del deposito;
- Kim (2014) dice che il CHF peggiora a causa del miscelamento tra la base fluida (nel caso acqua) e nanoparticelle che porta anche a una riduzione dell'ebollizione sulla superficie del riscaldatore;
- Bang e Chang (2005) dicono che il CHF migliora grazie al deposito di nanoparticelle che varia in funzione della densità dei siti di nucleazione;
- Shahmoradi et al. (2013) dicono che il CHF migliora con l'aumento della concentrazione delle nanoparticelle;
- Kwark et al. (2010) dicono che il CHF migliora con il deposito sulla superficie del riscaldatore delle nanoparticelle;
- Hedge et al. (2012) dicono che il CHF migliora grazie al deposito formato sulla superficie del riscaldatore;
- Sakashita (2012) dice che il CHF migliora grazie al deposito formato sulla superficie del riscaldatore;
- Ahn et al. (2010) dicono che il CHF migliora grazie al deposito formato sulla superficie del riscaldatore;

- Venkatachalapathy et al. (2013) dicono che il CHF aumenta con il numero di siti di nucleazione;
- Jung et al. (2012) dicono che il CHF migliora con l'aumento dell' area di ebollizione;
- Krishna et al. (2011) dicono che il CHF peggiora con l'aggiunta delle nanoparticelle;
- Kwark et al. (2010) dicono che il CHF migliora grazie alla formazione di un piccolo strato di materiale sulla superficie del riscaldatore dovuto al deposito delle nanoparticelle;
- Kwark et al. (2011) dicono che il CHF migliora in quanto migliora la bagnabilità della superficie del riscaldatore dovuta al deposito di nanoparticelle;
- Kole e Dey (2012) dicono che il CHF può migliorare in funzione della concentrazione delle nanoparticelle nel nanofluido; il CHF si dice che può migliorare perchè, nell'esperimento, non si è riscontrato un effettivo miglioramento del CHF tra base fluida e nanofluido;
- Amiri et al. (2014) dicono che il CHF migliora grazie all'aumento della rugosità della superficie dovuta a deposizione dello strato residuo di nanoparticelle;
- Mori et al. (2015) dicono che il CHF è influenzato dalla concentrazione delle nanoparticelle nel nanofluido e dalle dimensioni del riscaldatore;
- Kwark et al. (2010) dicono che il CHF migliora grazie al deposito dovuto all'ebollizione del nanofluido sulla superficie.

Da quanto elencato quindi si può concludere che non esiste una sola grandezza di interesse che ha particolare influenza sul miglioramento del CHF ma queste grandezze sono molteplici.

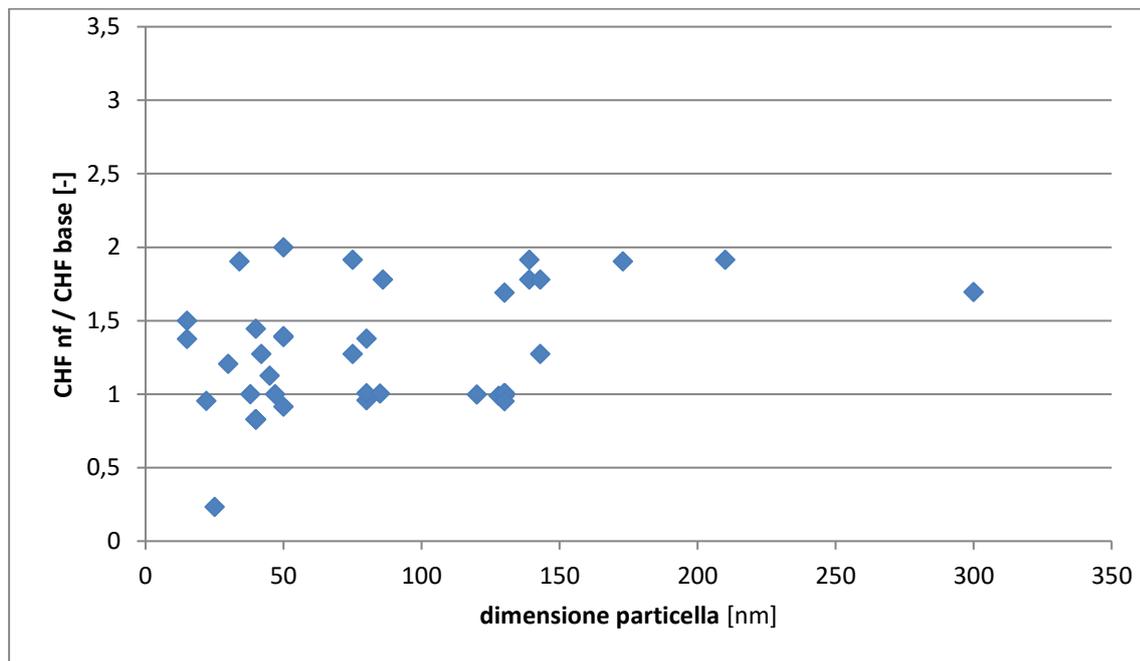
3.2 Analisi CHF in relazione ai parametri di interesse

In questa sessione ci occuperemo di porre in relazione il CHF con la dimensione della particella, la rugosità superficiale, il rapporto dimensione particella/rugosità, concentrazione di particelle.

Nei grafici seguenti viene rappresentato il legame tra queste grandezze:

3.2.1

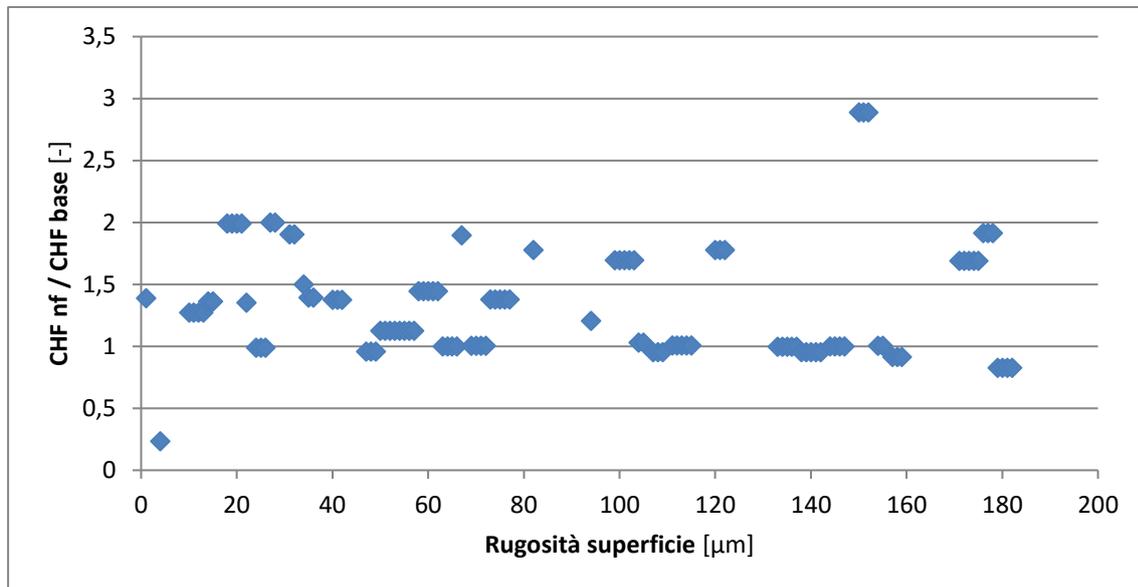
Figura 6: Relazione tra CHF nf / CHF base e dimensione delle nanoparticelle



Si può notare come il rapporto dei CHF non abbia una relazione ordinata secondo la dimensione della particella. In alcuni test si ha che un aumento delle dimensioni porta ad un aumento del rapporto tra i CHF, presupponendo quindi che più aumenta la dimensione della particella più aumenta il CHF del nanofluido. In altri invece l'esatto opposto, ovvero un aumento delle dimensioni provoca una diminuzione del rapporto tra i CHF. Altri ancora in cui non è possibile trovare una relazione tra le due variabili messe in gioco. In particolare si nota una certa densità di dati sotto i 150 nm e via via una dispersione di questi, a sottolineare che la maggior parte degli esperimenti è stata condotta con particelle di dimensioni comprese in un certo intervallo.

3.2.2

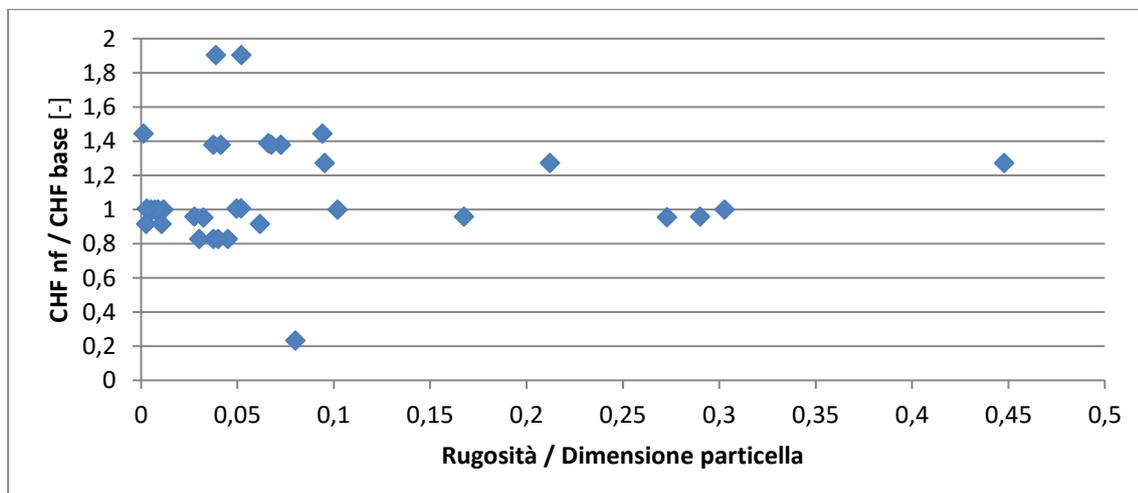
Figura 7: Relazione tra CHF nf / CHF base e rugosità della superficie del riscaldatore



Si può notare come il rapporto dei CHF non abbia una relazione ordinata con la rugosità della superficie. In alcuni test si ha che un aumento della rugosità porta ad un aumento del rapporto tra i CHF, presupponendo quindi che più aumenta la rugosità della superficie più aumenta il CHF del nanofluido. In altri invece l'esatto opposto, ovvero un aumento della rugosità provoca una diminuzione del rapporto tra i CHF. Altri ancora in cui non è possibile trovare una relazione tra le due variabili messe in gioco.

3.2.3

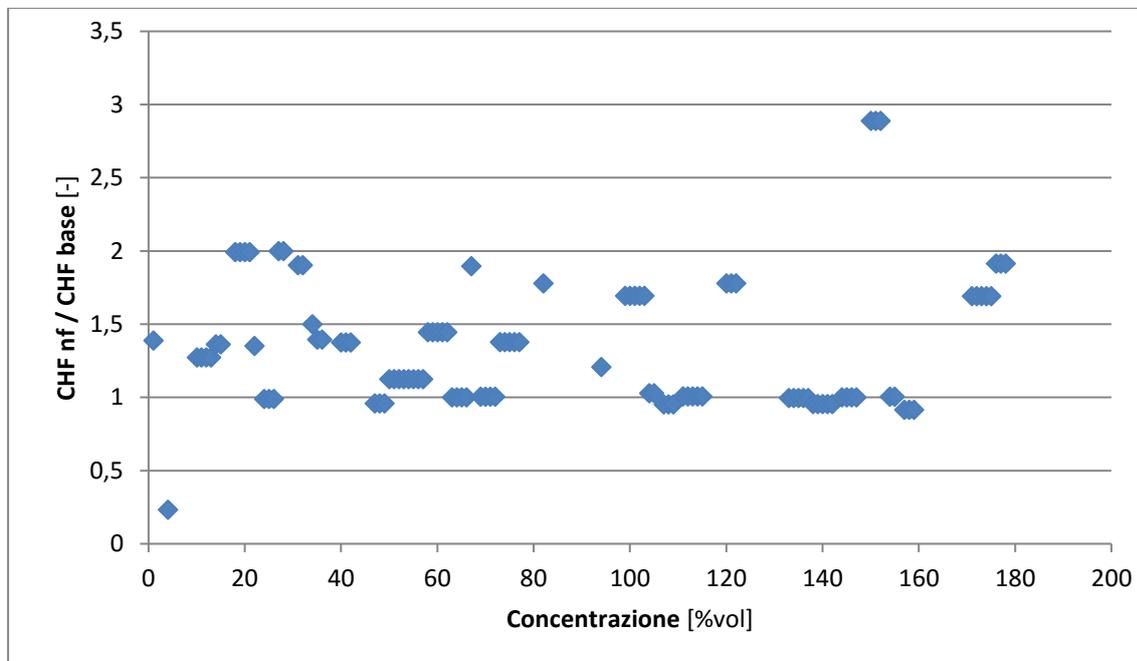
Figura 8: Relazione tra CHF nf / CHF base e rapporto tra rugosità superficie su dimensione della particella



Si può notare come il rapporto dei CHF non abbia una relazione ordinata con il rapporto tra la rugosità del riscaldatore e la dimensione della particella. In alcuni test si ha che un aumento del rapporto tra rugosità e dimensione porta ad un aumento del rapporto tra i CHF, presupponendo quindi che più aumenta il rapporto tra la rugosità e la dimensione più aumenta il CHF del nanofluido. In altri invece l'esatto opposto, ovvero un aumento del rapporto tra la rugosità e la dimensione provoca una diminuzione del rapporto tra i CHF. Altri ancora in cui non è possibile trovare una relazione tra le due variabili messe in gioco. Anche qui, come nel caso precedente, si ha una densità di dati maggiore sotto un valore di 0.1, ad evidenziare ancora che le ricerche effettuate hanno interessato solo valori simili di dimensione in relazione alla rugosità del riscaldatore.

3.2.4

Figura 9: Relazione tra CHF nf / CHF base e concentrazione della particella



Si può notare come il rapporto dei CHF non abbia una relazione ordinata con la concentrazione della particella. In alcuni test si ha che un aumento della concentrazione porta ad un aumento del rapporto tra i CHF, presupponendo quindi che più aumenta la concentrazione più aumenta il CHF del nanofluido. In altri invece l'esatto opposto, ovvero un aumento della concentrazione provoca una diminuzione del rapporto tra i CHF. Altri ancora in cui non è possibile trovare una relazione tra le due variabili messe in gioco. In particolare si nota un certo adagiamento dei valori tra i valori di rapporto di CHF tra 1 e 2; in questa fascia anche aumentando la concentrazione, non aumenta il rapporto tra i CHF confermando quindi una certa indipendenza tra le due variabili.

3.2.5 Analisi base fluida

I nanofluidi utilizzati vengono preparati con una base fluida acqua o glicole etilenico con l'inserimento poi delle nanoparticelle di metalli o derivati; in più possono essere presenti dei surfattanti che vanno ad addensare il fluido. Analizzando gli articoli si nota come delle basi fluide solo 3 sono glicole etilenico su 47 articoli visionati, 1 con glicole ed etanolo, 5 composte da acqua più surfattanti mentre le altre figurano solo come acqua. Facendo riferimento al parametro di interesse ovvero il CHF si giunge alla conclusione che:

- delle 3 basi con glicole 2 presentano un CHF che non migliora con l'aggiunta del nanofluido mentre solo in una migliora il CHF;
- delle 5 basi con surfattanti e acqua si nota sempre un miglioramento del CHF con l'aggiunta del nanofluido.

3.2.6 Analisi concentrazione

Considero la concentrazione di nanoparticelle all'interno della base fluida. Dagli articoli analizzati ricaviamo che la maggior parte delle concentrazioni è inferiore a 2% vol. In particolare solo in 5 esperimenti si riscontra una concentrazione superiore a questa soglia. In questi 5 casi il CHF:

- in 2 casi peggiora con l'aggiunta del nanofluido;
- in 2 casi rimane circa uguale quindi non c'è un miglioramento dovuto all'aggiunta dei nanofluidi;
- in un solo caso non si fa riferimento specifico ad un miglioramento o ad un peggioramento del CHF.

3.2.7 Analisi tipo di particella

Negli articoli analizzati possiamo raggruppare i tipi di nanoparticella principalmente in varie famiglie: ossido di rame (CuO), ossido di alluminio (Al_2O_3), ossido di zinco (ZnO), diossido di titanio (TiO_2), diossido di zirconio (ZrO_2) e CNT.

Negli articoli analizzati la più utilizzata è quella di Al_2O_3 in particolare abbiamo: 40.8% di Al_2O_3 , 20.4% di CuO, 14.28% di ZnO, 12.2% di TiO_2 , 8.16% di CNT, 4.08% di ZrO_2 .

Passiamo ad analizzare che influenza ha una particella piuttosto che un'altra sul CHF. Se consideriamo, ad esempio, i test che davano come risultato una diminuzione del CHF con l'aggiunta del nanofluido vediamo che non c'è una particella particolare che tende a far diminuire il CHF. Nel dettaglio dei valori di CHF peggiorativi si sono ottenuti per 3 volte con CuO e Al_2O_3 e una sola volta con ZnO. Facendo dunque un resoconto di tutti i risultati possiamo stilare la seguente Tabella 2 riepilogativa:

Tabella 2: CHF in funzione di tipo di nanoparticella

<i>Tipo di particella</i>	<i>CHF</i>		
	<i>Migliora</i>	<i>Peggiora</i>	<i>Circa uguale</i>
Al ₂ O ₃	15	3	2
CuO	7	3	
ZnO	3	1	1
TiO ₂	2		
CNT	2		
ZrO ₂	2		

CAPITOLO 4

4.1 Analisi *boiling after boiling*

Uno delle cause più comuni del miglioramento del CHF è la deposizione di nanoparticelle sulla superficie del riscaldatore che portano alla formazione di strati di materiale che ricoprono la superficie. Questo fatto avviene fin dall'inizio del processo di ebollizione del nanofluido e, se il processo di ebollizione avviene in più step, ad ogni step si avrà una quantità di deposito diversa in funzione del tempo di ebollizione di ciascuna fase, della temperatura di ebollizione del nanofluido, della concentrazione di nanoparticelle, della bagnabilità della superficie del riscaldatore e della porosità di quest'ultima. In questo caso si parla quindi di *boiling after boiling* (b.a.b.) quando appunto si hanno più fasi di ebollizione ed eventuale deposizione.

Tuttavia, come visto e analizzato negli articoli, il *boiling after boiling* può essere visto come un vantaggio ma anche uno svantaggio in base ai parametri citati sopra che va ad influenzare. Si può avere infatti, come visto precedentemente, un miglioramento del CHF se per esempio consideriamo deposito relazionato con l'area della superficie del riscaldatore, o ancora con la rugosità della superficie ecc. Può però essere utilizzato anche per altri scopi come per esempio la produzione di superfici trattate per applicazioni industriali.

Qui di seguito si riportano delle voci di interesse per il *boiling after boiling* attraverso la Tabella 3:

Tabella 3: Tabella b.a.b. riassuntiva

Nome	Tipo particella	Fluido base	Deposito	N°di b.a.b
Ahn and Kim (2013)	Al ₂ O ₃	acqua	si	non specificato
Ahn et al. (2010)	non specificate	acqua	si	3 test
Amiri et al. (2014)	3 tipi: CNT-Ag, CNT-Cys, CNT puro + surfattanti (GA) 0.1%wt	acqua	si	non specificato
Balcilar et al. (2012)	TiO ₂	acqua	non specificato	3 test con 3 differenti metodi
Bang and Chang (2005)	Al ₂ O ₃	acqua	non specificato	4 sub-test

Chopkar et al. (2008)	ZrO ₂	acqua + idrossido di tetrametilammonio (surfattante)	si	3 corse
Cieslinski and Kaczmarczyk (2011)	CuO e Al ₂ O ₃	acqua	si	circa 90 min
Das et al. (2013)	TiO ₂	acqua	si	non specificato
Das et al. (2003)	Al ₂ O ₃	acqua	non specificato	8 corse pre-sperimentali and poi esperimenti dopo 4 giorni e 2 settimane
Fokin et al. (2009)	ZrO ₂	acqua	si	non specificato
Gerardi et al. (2011)	diamante e silicio	acqua	si	non specificato
Harish and Sajith (2011)	Al ₂ O ₃	acqua	si	3 corse
Hedge et al. (2012)	CuO	acqua	si	2 cicli in 2 giorni differenti
Hedge et al. (2012)	Al ₂ O ₃	acqua	si	2 cicli
Hedge et al. (2012)	CuO	acqua	si	2 cicli di riscaldamento da 3 min
Hedge et al. (2013)	CuO	acqua	si	non specificato
Jung et al. (2012)	Al ₂ O ₃ + alcool polivinilico (PVA) come stabilizzante	acqua	non specificato	non specificato
Kathiravan et al. (2010)	CuO	acqua/ acqua + surfattanti	si	12 ore
Kim et al. (2010)	ZnO	acqua	si	2-3 ore
Kim et al. (2013)	Al ₂ O ₃	acqua	si	non specificato
Kim (2014)	CuO	acqua	si	non specificato

Kole and Dey (2012)	ZnO	glicole etilenico	si	non specificato
Krishna et al. (2011)	CuO	acqua	si	non specificato
Kwark et al. (2010)	Al ₂ O ₃ , CuO, diamante	acqua	si	2 ore
Kwark et al. (2010)B	Al ₂ O ₃ , CuO, diamante	acqua	si	3 corse
Kwark et al. (2010)C	Al ₂ O ₃	etanolo e acqua	si	15 corse
Kwark et al. (2011)	Al ₂ O ₃ , H ₃ BO ₃ (acido bórico) e NaCl	etanolo e acqua	si	4 corse
Lee and Chang (2012)	Al ₂ O ₃ , CNT	acqua	non specificato	non specificato
Liu et al. (2004)	Fe ₃ O ₄ + surfattanti	acqua	non specificato	non specificato
Mori et al. (2015)	TiO ₂	acqua	si	non specificato
Mourgues et al. (2013)	ZnO	acqua	si	4 test da 40–50 min e ripetuti tra 3 e 6 volte
Okawa et al. (2012)	TiO ₂	acqua	si	1 ora
Park et al. (2011)	MWCNT	acqua + DISPERBYK 184	si	3 volte
Raveshi et al. (2013)	Al ₂ O ₃ + sodio dodecilbenzene (SDBS) come disperdente	acqua + glicole etilico 50-50	si	3 volte
Sakashita (2012)	TiO ₂ + dodecil solfato di sodio SDS (surfattante)	acqua + surfattanti	si	2 corse
Sarafraz and Hormozi (2014)	Al ₂ O ₃	glicole etilico + disperdente SDS 0.1%	non specificato	non specificato

Seo et al. (2015)	non specificata	acqua	non specificato	non specificato
Shahmoradi et al. (2013)	Al ₂ O ₃	acqua distillata	si	3 corse
Shoghl et al. (2013)	CuO, ZnO, surfattanti (SDS)	acqua	si	non specificato
Suriyawong and Wongweises (2010)	TiO ₂	acqua	non specificato	non specificato
Truong et al. (2010)	diamante, ZnO, Al ₂ O ₃	acqua	si	processo di copertura da 45 min
Venkatachalapathy et al. (2013)	Al ₂ O ₃	acqua	non specificato	non specificato
Wen (2012)	Al ₂ O ₃	acqua	si	non specificato
Wen et al. (2011)	alfa-Al ₂ O ₃	acqua	si	non specificato
White et al. (2011)	ZnO	acqua	si	non specificato
White et al. (2010)	ZnO	acqua (senza surfattanti)	si	4 cicli
Xue et al. (2012)	MWCNT	Gum Arabic+ acqua	si	non specificato

Come si può notare nella maggior parte degli articoli c'è deposito quindi è interessante andare a studiare che effetti ha quest'ultimo sul CHF. Inoltre per numero di b.a.b. si intende il numero di ripetizioni di cicli di deposizione dello strato di nanoparticelle sulla superficie del riscaldatore. Se, per esempio, si hanno 4 cicli vuol dire che si è testata la superficie trattata per 4 volte dove in ognuna si faceva depositare uno strato di nanoparticelle sulla superficie.

4.2 Parametri che vengono influenzati dal *boiling after boiling*

Come visto nel capitolo 3 quasi tutti i parametri che caratterizzano un esperimento vengono influenzati dal b.a.b.

Si nota in quasi tutti gli articoli che il CHF migliora con l'aggiunta del nanofluido e in particolare migliora dopo che si è formato il deposito sulla superficie. Prendendo come parametri di confronto: CHF base su superficie liscia e CHF nanofluido possiamo andare a studiare e capire quanto può essere benefico l'effetto del deposito attraverso la seguente Tabella 4:

Tabella 4: Confronto CHF in condizioni di b.a.b.

<i>Autore</i>	<i>CHF base [kW/m²]</i>	<i>CHF nf [kW/m²]</i>	<i>miglioramento dovuto a.../peggioramento dovuto a...</i>
Ahn and Kim (2013)	circa 1550	circa 2096	CHF è proporzionale all'area della superficie del riscaldatore e aumenta dopo che c'è stato deposito
Ahn et al. (2010)	non specificato	circa 1900	CHF migliora grazie al deposito formato sulla superficie del riscaldatore
Amiri et al. (2014)	circa 550	circa 1588.87	CHF migliora grazie all'aumento della rugosità della superficie dovuta a deposizione dello strato di residuo nano particelle
Balcilar et al. (2012)	non specificato	non specificato	non specificato

Bang and Chang (2005)	circa 500	circa 562.5	CHF migliora grazie al deposito di nano particelle che varia in funzione della densità dei siti di nucleazione
Chopkar et al. (2008)	circa 1450	circa 1383.3	non specificato
Cieslinski and Kaczmarczyk (2011)	circa 88	circa 87	non specificato
Cieslinski and Kaczmarczyk (2011)	circa 88	circa 88.5	non specificato
Das et al. (2013)	non specificato	circa 142.5	non specificato
Das et al. (2003)	circa 110	circa 110	non specificato

Fokin et al. (2009)	circa 2200000	circa 3300000	non specificato
Gerardi et al. (2011)	circa 976	circa 1858.5	non specificato
Harish and Sajith (2011)	circa 550	circa 503.335	non specificato
Hedge et al. (2012)	circa 1800	circa 2500	CHF migliora grazie all'aumento di temperatura dovuta al deposito
Hedge et al. (2012)	circa 1850	circa 2550	CHF migliora grazie al deposito formato sulla superficie del riscaldatore
Hedge et al. (2012)	circa 1200	circa 2400	CHF migliora aumentando la concentrazione delle nano particelle all'interno del nano fluido

Hedge et al. (2013)	circa 1850	circa 2580	CHF migliora con l' aumento della temperatura della superficie, la quale varia in base alla quantità di deposito che si è formato
Jung et al. (2012)	circa 265	circa 449	CHF migliora con l' aumento dell' area di ebollizione
Kathiravan et al. (2010)	circa 1044	circa 1385	CHF migliora in relazione della struttura microscopica e topografia della superficie del riscaldatore i quali miglioramenti sono generati dalla formazione del deposito
Kim et al. (2010)	non specificato	circa 1775.5	non specificato
Kim et al. (2013)	circa 265	circa 448	non specificato
Kim (2014)	circa 120	circa 115	CHF peggiora con il miscelamento di nano con acqua

Kole and Dey (2012)	circa 320	circa 319	CHF aumenta con la concentrazione delle nanoparticelle
Krishna et al. (2011)	circa 565	circa 585	CHF peggiora con l'aggiunta delle nano particelle
Kwark et al. (2010)	circa 1010	circa 1915	CHF migliora con deposito
Kwark et al. (2010)B	circa 1010	circa 1812.5	CHF migliora con lo strato di nano creato dal deposito
Kwark et al. (2010)C	circa 1010	circa 1933.3	CHF migliora con deposito delle nanoparticelle
Kwark et al. (2011)	circa 1010	non specificato	CHF migliora con aumento bagnabilità superficie dovuta a deposito

Lee and Chang (2012)	non specificato	non specificato	non specificato
Liu et al. (2004)	non specificato	non specificato	non specificato
Mori et al. (2015)	non specificato	non specificato	CHF varia in base alla dimensione del riscaldatore e con la concentrazione delle nanoparticelle
Mourgues et al. (2013)	circa 1189.5	circa 1614.5	CHF aumenta con aumento di deposito
Okawa et al. (2012)	non specificato	circa 1975000	non specificato
Park et al. (2011)	circa 590	circa 1175	CHF migliora con aumento di concentrazione di CNT

Raveshi et al. (2013)	circa $6,5 \cdot 10^5$	da 151875 a 590625	non specificato
Sakashita (2012)	circa 1310000	circa 2330000	CHF migliora grazie al deposito formato sulla superficie del riscaldatore
Sarafraz and Hormozi (2014)	circa 130	circa 130	non specificato
Seo et al. (2015)	non specificato	non specificato	non specificato
Shahmoradi et al. (2013)	circa 900	circa 1300	CHF aumenta con l'aumento della concentrazione delle nanoparticelle
Shoghi et al. (2013)	circa 340	circa 350	non specificato

Suriyawong and Wongweises (2010)	circa 897.5	non specificato	non specificato
Truong et al. (2010)	circa 1420000	da 1590000 a 1910000	CHF migliora grazie al deposito
Venkatachalapathy et al. (2013)	circa 1000	circa 1206.67	CHF aumenta con il numero di siti di nucleazione
Wen (2012)	circa 105	circa 100	non specificato
Wen et al. (2011)	circa 103.5	circa 104	CHF migliora con deposito delle nanoparticelle
White et al. (2011)	circa 240	circa 198.5	non specificato

White et al. (2010)	non specificato	non specificato	non specificato
Xue et al. (2012)	non specificato	non specificato	non specificato

Si nota come parecchi scienziati non riescano a dare una spiegazione al miglioramento del CHF da base a nanofluido, in quanto è un campo molto complesso all'interno del quale è difficile ed azzardato trarre delle conclusioni. Tuttavia alcuni scienziati hanno provato a dare delle spiegazioni e come detto in precedenza queste sono molteplici. Si ha che il deposito ha influenza sul CHF:

- per via dell'aumento della temperatura della superficie del riscaldatore;
- per via dell'aumento dei siti di nucleazione;
- per via dell'aumento della concentrazione delle nanoparticelle;
- per via dell'aumento della bagnabilità della superficie;
- per via dell'aumento dell' area del riscaldatore;

CAPITOLO 5

Conclusioni

In questo lavoro di tesi si è visto cosa sono i nanofluidi, quali tipi di nanoparticelle vengono utilizzate per produrli, che processi di fabbricazione esistono, quali sono le problematiche che si affrontano trattandoli e alcune applicazioni. Ma tirando le somme cosa ne traiamo da questo lavoro?

Ebbene abbiamo visto che esistono tanti studi e ricerche riguardanti l'ebollizione dei nanofluidi, quasi tutti avvenuti in poco più di un decennio, il primo risale infatti al 2003. Questo a dimostrazione che la tecnologia dei nanofluidi è una tecnologia nuova, appena scoperta e in continua espansione ed evoluzione. E come tutte le cose nuove ha bisogno di tempo per essere capita ed utilizzata nei modi giusti e più economicamente vantaggiosi.

Abbiamo visto poi che molti scienziati hanno provato a studiare questa nuova tecnologia giungendo ognuno a conclusioni diverse. Questo perché non si sa ancora quale sia il più efficace metodo di utilizzo dei nanofluidi; alcuni hanno cercato di utilizzarlo come composto per raffreddare una superficie di un riscaldatore, unendo dunque le nanoparticelle ad una base liquida e andando poi a vedere come variavano le grandezze di interesse. Altri hanno fatto depositare le nanoparticelle direttamente sulla superficie interessata e poi hanno fatto lambire la superficie dal fluido base. Quindi c'è ancora confusione su come utilizzare i nanofluidi.

In questo lavoro è stato analizzato il flusso termico critico (CHF) e si è notato che, nella maggior parte dei casi, l'aggiunta delle nanoparticelle alla base fluida va a migliorare il CHF. Nel dettaglio si è notato che sui 47 articoli analizzati in 29 il CHF migliorava, in 6 peggiorava, in 8 rimaneva circa uguale. A questo punto si è cercato di capire a cosa fosse dovuto questo miglioramento e quindi si sono analizzati l'influenza di diversi parametri tra i quali la dimensione delle nanoparticelle, la rugosità della superficie del riscaldatore, la concentrazione delle nanoparticelle. Tra queste si è notato che non c'è un effetto predominante di qualche parametro sugli altri, a dire quindi che tutte le grandezze considerate influenzano in maniera diversa e indipendente il CHF. Poi si è andato a studiare il *bolting after boiling* (b.a.b.) ovvero la deposizione di materiale residuo sulla superficie del riscaldatore. Questo fatto è comune a quasi tutti gli esperimenti analizzati ed è il motivo principale del miglioramento del CHF. Si vede infatti che tutti i parametri prima elencati cambiano il loro stato in funzione del deposito dovuto a b.a.b.

In questo lavoro si è cercato di esporre in modo chiaro e ordinato un argomento che è nato appena poco più di un decennio fa e si sta rapidamente evolvendo. Come si è visto i nanofluidi offrono diverse possibilità applicative, dal miglioramento dello scambio termico a una alternativa modalità di

produzione di superfici trattate utilizzando il boiling after boiling. Non si riesce a capire ancora quale sia il loro ambito di utilizzo ideale ma una cosa è certa, i nanofluidi saranno il futuro proprio grazie alla loro duttilità in diversi ambiti applicativi.

NOMENCLATURA

CHF: flusso critico di calore;

HTC: coefficiente di scambio termico;

b.a.b.: *boiling after boiling*;

A: area della superficie di scambio termico [m^2];

h: coefficiente di scambio termico [$W/(m^2K)$];

q: flusso di calore scambiato (energia termica scambiata espressa come calore scambiato nell'unità di tempo) [$J/s = W$];

Q: calore scambiato (energia termica scambiata sotto forma di calore) [J];

T_w : temperatura della superficie;

T_f : temperatura del fluido;

ΔT : differenza di temperatura [K];

Δt : intervallo di tempo [s];

CNT : nanotubi in carbonio;

SWCNT : nanotubo a parete singola costituito da un singolo foglio grafítico avvolto su sé

stesso;MWCNT : nano tubo a parete multipla formato da più fogli avvolti coassialmente uno sull'altro;

BIBLIOGRAFIA

Cosa sono i nano fluidi e quali sono le loro possibili applicazioni? (Das S.K., Choi S.U.S., Yu W., Pradeep T., 2008, Nanofluids – science and technology, Ed. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, USA, Choi S.U.S., 2008, Nanofluids: A New Field of Scientific Research and Innovative Applications, Heat Transfer Engineering, 29(5):429–431);

Cesare Bonacina, Alberto Cavallini, Lino Mattarolo, Trasmissione del calore, cleup editore;

Articoli:

H. S. Ahn, M. H. Kim, The boiling phenomenon of alumina nanofluid near critical heat flux, International Journal of Heat and Mass Transfer 62 (2013) 718–728;

H. S. Ahn, C. Lee, H-J Jo, S-H Kang, J. Kim, J. Shin, M. Hwan Kim, H. Kim, Pool boiling CHF enhancement by micro/nanoscale modification of zircaloy-4 surface, Nuclear Engineering and Design 240 (2010) 3350–3360;

A. Amiri, S.N. Kazi, B.T. Chew, M. Shanbedi, S. Zeinali Heris, H. Amiri, H. Eshghi, Pool boiling heat transfer of CNT/water nanofluids, Applied Thermal Engineering 71 (2014) 450 e 459;

M. Balcilar, A.S. Dalkilic, A. Suriyawong, T. Yiamsawas, S. Wongwises, Investigation of pool boiling of nanofluids using artificial neural networks and correlation development techniques, International Communications in Heat and Mass Transfer 39 (2012) 424–431;

I. C. Bang, S. H. Chang, Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃–water nanofluids from a plain surface in a pool, International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005) 2407–2419;

M. Chopkar, I. Manna, A. K. Das, P. K. Das, Pool boiling heat transfer characteristics of ZrO₂–water nanofluids from a flat surface in a pool, Heat Mass Transfer 44(2008):999–1004;

J. Cieslinski, T. Kaczmarczyk, Pool boiling of water-Al₂O₃ and water-Cu nanofluids on horizontal smooth tubes, Cieslinski and Kaczmarczyk Nanoscale Research Letters 6, 2011: 220;

S. Das, D. S. Kumar, A. Bhowmik, Dr. S. Bhaumik, ENHANCEMENT AND CHARACTERIZATION OF NUCLEATE POOL BOILING HEAT TRANSFER ON TITANIUM OXIDE NANOCOATED SURFACE, Proceedings of the 22th National and 11th International ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference December 28-31, (2013), IIT Kharagpur, India;

S. K. Das, N. Putra, W. Roetzel, Pool boiling characteristics of nano-fluids, International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 851–862;

B. S. Fokin, M. Y. Belenkiy, V. I. Almjashev, V. B. Khabensky, O. V. Almjasheva, and V. V. Gusarov, Critical Heat Flux in a Boiling Aqueous Dispersion of Nanoparticles;

C. Gerardi, J. Buongiorno, L. Hu, T. McKrell, Infrared thermometry study of nanofluid pool boiling phenomena, Gerardi et al. Nanoscale Research Letters 6, 2011: 232;

G. Harish, V. Emlin, V. Sajith, Effect of surface particle interactions during pool boiling of nanofluids, International Journal of Thermal Sciences 50 (2011) 2318 - 2327;

R. N. Hegde, S. S. Rao, R. P. Reddy, Investigations on Boiling-Induced Nanoparticle Coating, Transient Characteristics, and Effect of Pressure in Pool Boiling Heat Transfer on a Cylindrical Surface, Experimental Heat Transfer: A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion;

R. N. Hegde, S. S. Rao, R.P. Reddy, Studies on nanoparticle coating due to boiling induced precipitation and its effect on heat transfer enhancement on a vertical cylindrical surface, Experimental Thermal and Fluid Science 38 (2012) 229–236;

R. N. Hegde, S. S. Rao, R. P. Reddy, Experimental studies on CHF enhancement in pool boiling with CuO-water nanofluid, Heat Mass Transfer 48 (2012):1031–1041;

R. N. Hegde, S. S. Rao, R. Reddy, Experimental Investigations of Pool Boiling Heat Transfer Characteristics on a Vertical Surface Using CuO Nanoparticles in Distilled Water, Heat Transfer Engineering, 35:14-15, 1279-1287;

J. Jung, E. S. Kim, Y. T. Kang, Stabilizer effect on CHF and boiling heat transfer coefficient of alumina/water nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 1941–1946;

- R. Kathiravan, R. Kumar, A. Gupta, R. Chandra, Preparation and pool boiling characteristics of copper nanofluids over a flat plate heater, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 1673–1681;
- S. Kim, H. D. Kim, H. Kim, H. S. Ahn, H. Jo, J. Kim, M. H. Kim, Effects of nano-fluid and surfaces with nano structure on the increase of CHF, *Experimental Thermal and Fluid Science* 34 (2010) 487–495;
- E. S. Kim, Y. T. Kang, J. Jung, The effect of surface area on pool boiling heat transfer coefficient and CHF of Al₂O₃/water nanofluids, *Journal of Mechanical Science and Technology* 27 (2013) 10 3177–3182;
- Y. C. Kim, Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer in subcooled water-CuO nanofluid, *Journal of Mechanical Science and Technology* 28 (8) (2014) 3371–3376;
- M. Kole, T.K. Dey, Investigations on the pool boiling heat transfer and critical heat flux of ZnO-ethylene glycol nanofluids, *Applied Thermal Engineering* 37 (2012) 112 - 119;
- K. Hari Krishna, H. Ganapathy, Pool Boiling Characteristics of Metallic Nanofluids, *Journal of Heat Transfer* NOVEMBER 2011, 133 (2011) 111501-1;
- S. M. Kwark, G. Moreno, R. Kumar, H. Moon, S. M. You, Nanocoating characterization in pool boiling heat transfer of pure water, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 4579–4587;
- S. M. Kwark, R. Kumar, G. Moreno, S. M. You, J. Yoo, Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 972–981;
- S. M. Kwark, M. Amaya, R. Kumar, G. Moreno, Seung M. You, Effects of pressure, orientation, and heater size on pool boiling of water with nanocoated heaters, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 5199–5208;
- S. M. Kwark, M. Amaya, H. Moon, S. M. You, Effect of soluble additives, boric acid (H₃Bo₃) and salt (NaCl), in pool boiling heat transfer, *Nuclear Engineering and Technology*, 43 No.3 (2011);
- J. Lee, S. H. Chang, An experimental study on CHF in pool boiling system with SA508 test heater under atmospheric pressure, *Nuclear Engineering and Design* 250 (2012) 720– 724;

L. Junhong, G. Jianming, L. Zhiwei, L. Hui, Experiments and mechanism analysis of pool boiling heat transfer enhancement with water-based magnetic fluid, *Heat Mass Transfer* 41 (2004): 170–175;

S. Mori, S. Mt Aznam, K. Okuyama, Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling of water by nanoparticle-coating and a honeycomb porous plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 80 (2015) 1–6;

A. Mourgues, V. Hourtané, T. Muller, M. Caron-Charles, Boiling behaviors and critical heat flux on a horizontal and vertical plate in saturated pool boiling with and without ZnO nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 57 (2013) 595–607;

T. Okawa, M. Takamura, T. Kamiya, Boiling time effect on CHF enhancement in pool boiling of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 2719–2725;

K.-J. Park, D. Jung, D.-G. Kang, S. E. Shim, Nucleate boiling heat transfer in nanofluids with carbon nanotubes up to critical heat fluxes, *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 (10) (2011) 2647~2655;

M. R. Raveshi, A. Keshavarz, M. S. Mojarrad, S. Amiri, Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement of alumina–water–ethylene glycol nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science* 44 (2013) 805–814;

H. Sakashita, CHF and near-wall boiling behaviors in pool boiling of water on a heating surface coated with nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 7312–7320;

M.M. Sarafraz, F. Hormozi, Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of dilute Al₂O₃–ethyleneglycol nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 58 (2014) 96–104;

H. Seo, I. C. Bang, J. H. Chu, S.-Y. Kwon, Pool boiling CHF of reduced graphene oxide, graphene, and SiC-coated surfaces under highly wettable FC-72, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2014);

Z. Shahmoradi, N. Etesami, M. N. Esfahany, Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 47 (2013) 113–120;

S. N. Shoghl, M. Bahrami, Experimental investigation on pool boiling heat transfer of ZnO, and CuO water-based nanofluids and effect of surfactant on heat transfer coefficient, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 45 (2013) 122–129;

A. Suriyawong, S. Wongwises, Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO₂–water nanofluids at very low concentrations, *Experimental Thermal and Fluid Science* 34 (2010) 992–999;

B. Truong, J. Buongiorno, T. McKrell, L. Hu, Modification of sandblasted plate heaters using nanofluids to enhance pool boiling critical heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 85–94;

S.Venkatachalapathy, R. Kamatchi, Y. S. Kannan, EFFECT OF SURFACE MODIFICATIONS ON THE ENHANCEMENT OF CRITICAL HEAT FLUX IN SATURATED POOL BOILING, *International Conference on Advance Research in Mechanical , Aeronautical And Civil Sep 7, 2013 Pattaya*;

D. Wen, Influence of nanoparticles on boiling heat transfer, *Applied Thermal Engineering* 41 (2012) 2-9;

D. Wen, M. Corr, X. Hu, G. Lin, Boiling heat transfer of nanofluids: The effect of heating surface modification, *International Journal of Thermal Sciences* 50 (2011) 480-485;

S. B. White, A. J. Shih, K. P. Pipe, Boiling surface enhancement by electrophoretic deposition of particles from a nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (2011) 4370–4375;

S. B. White, A. J. Shih, and K. P. Pipe, Effects of nanoparticle layering on nanofluid and base fluid pool boiling heat transfer from a horizontal surface under atmospheric pressure, *Journal of Applied Physics* 107, 114302 (2010);

H. S. Xue, J. R. Fan, Y. C. Hu, R. H. Hong, Particulate fouling during the pool boiling heat transfer of MWCNT nanofluid, *Heat Mass Transfer* (2012) 48:875–879.