فصلنامه
مهندسی مکانیک و ارتعاشات
jvibme.semnaniau.ac.ir

مروری بر انتقال حرارت جوششی در نانو سیالات

پریسا احمدی[۱]، هادی کارگر شریف آباد [۲*]

۱- مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
۲- مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
* سمنان، صندوق پستی: ۳۵۱۴۵-۱۷۹ ، h.kargar@semnaniau.ac.ir

اطلاعات مقاله
مقاله مروری
دریافت: ۱۲آبان ۱۴۰۰
پذیرش: ۲۳ اسفند ۱۴۰۰
ارائه در سایت: ۱۲ اردیبهشت ۱۴۰۱
کلیدواژگان
نانوسیال
انتقال حرارت
جوشش

چکیده
نانوسیال ها بر اساس خواص ترموفیزیکی جالب و کاربرد در شاخه های مهم مهندسی نظیر انتقال حرارت، شدیداً مورد علاقه محققان قرار گرفته اند. هرچند که تناقضاتی در نتایج آزمایشگاهی و مباحث ارائه شده در موارد متعددی مثل رسانش گرمایی مؤثر، ضریب انتقال گرمای جابجایی و نرخ انتقال گرمای جوششی آن ها وجود دارد. برخلاف انتقال گرمای جابجایی، تلاش های محدودی در زمینه جوشش نانوسیال ها صورت گرفته است. اگرچه، برای بهره برداری کردن از نانوسیال ها به عنوان نسل آینده خنک کننده ها تحقیقات روی جوشش بسیار ضروری می باشد. فرآیند جوشش در سیالات مغناطیسی (دسته ای از نانو سیال ها با نانو ذرات مغناطیسی عمدتاً آهنی) علاوه بر نشان دادن مشخصه های کلی جوشش نانوسیال ها به دلیل قابلیت کنترل توسط اعمال میدان مغناطیسی قابل توجه است.

A review of boiling heat transfer in nanofluids

Parisa Ahmadi[1], Hadi Kargarsharifabad[2*]

1- Energy and Sustainable Development Research Center, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
2- Energy and Sustainable Development Research Center, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
* P.O.B. 35145-179 Semnan, Iran, h.kargar@semnnaniau.ac.ir

Article Information
Original Research Paper
Received 3 November 2021
Accepted 14 March 2022
Available Online 2 May 2022
Keywords
Nanofluid
heat transfer
boiling

ABSTRACT
Nanofluids have been highly interested by researchers based on their interesting thermophysical properties and application in important branches of engineering such as heat transfer. However, there are contradictions in the laboratory results and the topics presented in several cases such as effective heat conduction, convection heat transfer coefficient and boiling heat transfer rate. In contrast to convective heat transfer, limited efforts have been made in boiling nanofluids. However, to exploit nanofluids as the next generation of coolants, boiling research is essential. The boiling process in magnetic fluids (a class of nanofluids with magnetic nanoparticles, mainly iron), in addition to showing the general characteristics of the boiling of nanofluids, is remarkable due to its ability to be controlled by the application of a magnetic field.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:
Please cite this article using:
Parisa Ahmadi, Hadi Kargarsharifabad, A review of boiling heat transfer in nanofluids, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 13, No. 1, pp. 7-11, 2022 (In Persian)

۱- مقدمه

فرآیند جوشش بر اساس پتانسیلی که برای انتقال مقادیر بسیار بالای گرما در اختلاف دماهای کم دارد، مکانیزمی بسیار مؤثر و رایج در انتقال حرارت است. جوشش در بسیاری از سیستم های مهندسی شامل بویلرها در نیروگاه، تبخیر کننده ها در سیستم های تبرید و راکتور های هسته ای اتفاق می افتد. همچنین کاربرد انتقال حرارت جوششی در خنک سازی تجهیزات الکترونیکی اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به بار حرارتی افزایش یابنده قطعات میکروالکترونیکی کوچک و . . .، خنک کنندگی برای ایجاد عملکرد مطلوب و دوام چنین قطعاتی یکی از مهمترین مسائل تکنیکی در بیشتر صنایع رده بالا محسوب می شود. روش قابل ذکر برای افزایش نرخ خنک کنندگی استفاده از سطوح انتقال حرارت گسترش یافته است، هرچند این راه به افزایش نامطلوب در سایز سیستم مدیریت گرمایی نیاز دارد. به علاوه، خواص گرمایی ضعیف ذاتی سیال های منتقل کننده گرمای قدیمی (سنتی) مثل آب، اتیلن گلیکول، یا روغن موتور[1] به شدت عملکرد خنک کنندگی را محدود می کند. بنابراین این تکنیک ها برای نیاز خنک کنندگی در صنایع با تکنولوژی بالا مناسب نیستند.

دسته ای از سیالات که به عنوان نانو سیال نام گذاری شده اند در بهبود فرآیند های انتقال حرارت مؤثر هستند. تعریف این رده جدید از سیالات انتقال دهنده حرارت (نانوسیال ها) به این صورت است: سوسپانسیون ذرات جامد، میله ها[2] و لوله ها[3] با ابعاد نانومتر در سیال های معمول در انتقال حرارت. اگرچه سوسپانسیون های نانوذره در مطالعات انتقال حرارت از سال ۱۹۸۴ بوسیله یانگ و ما[4] [۱] و سپس در سال ۱۹۹۳ بوسیله ماسودا و همکارانش[5] [۲] استفاده شده بود، تنها در سال ۱۹۹۵ بود که توسط چوی[6] [۳] مفهوم نانو سیال[7] برای رسیدن به خنک کنندگی مطلوب در صنایع با تکنولوژی بالا استفاده شد. نانوسیال ها برای رسیدن به خواص ترموفیزیکی، نفوذ گرمایی و مخصوصاً رسانش گرمایی بهتر از سیالات پایه به وجود آمدند و شدیداً توسط محققان و پژوهشگران به علت عملکرد گرمایی بهبود یافته شان، کاربردها و پتانسیل بالا در شاخه های مختلف مورد توجه قرار گرفتند. در مقایسه با مطالعات روی رسانش گرمایی، کارهای محدودی در مورد جوشش، droplet spreading و انتقال گرمای جابجایی نانو سیال ها انجام شده است گرچه این موارد برای بهره برداری کردن از نانوسیال ها به عنوان نسل آینده خنک کننده ها بسیار مهم هستند.

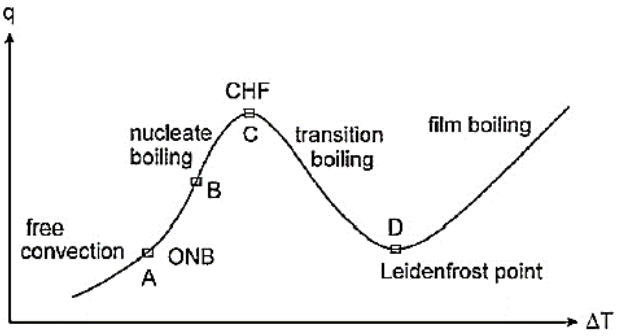
۲- انتقال حرارت جوششی-مفهوم پایه

جوشش یک پروسه تغییر فاز (از مایع به بخار) است که در آن حباب های بخار یا روی سطح گرم شده یا درون مایع فوق اشباع در لایه چسبیده (بسیار نزدیک) به سطح مذکور تشکیل می شوند. اگرچه جوشش یک فرآیند پیچیده و مبهم است، یک روش بسیار مؤثر انتقال حرارت در بسیاری از سیستم های تبدیل انرژی و مبدل گرما مثل سیستم های خنک کنندگی اجزا الکترونیکی با دانسیته انرژی بالا محسوب می شود.

دو نوع عمده جوشش وجود دارد: جوشش استخری[8] و جوشش جریانی یا جابجایی اجباری[9] . جوشش استخری اشاره دارد به جوشش روی یک سطح گرم شده (هیتر) غوطه ور در یک حجم از سیال در ابتدا ساکن، در حالی که جوشش جریانی عبارت است از جوشش در سیال جریان یافته شده که سطح گرمایش می تواند دیواره های کانال حاوی جریان باشد. شار گرمایی در هر نوع جوششی یکی از مهمترین پارامترها در طراحی و عملکرد تجهیزات انتقال گرما با شار گرمایی بالا، مثل بویلر، اواپراتور، تجهیزات الکترونیکی و موتورهای موشک است. هنوز تعداد خیلی کمی کار روی جوشش جریانی نانوسیالات انجام شده است و در اینجا جوشش استخری مورد بحث قرار گرفته است. دو پارامتر مهم در جوشش استخری درجه فوق گرم دیوار (اختلاف دمای بین دیواره و دمای اشباع مایع در فشار محلی، $\Delta T = T_W - T_S$) و شار گرمایی(q'') است. منحنی جوشش استخری کلاسیک، که یک نمودار از شار گرمایی بر حسب دمای افزونی (ΔT) است، در شکل ۱ نشان داده شده است.

[1] Engin oil (EO)
[2] Rods
[3] Tubes
[4] Yang & Ma
[5] Masuda et al.
[6] Choi
[7] Nanofluid

[8] Pool boiling
[9] Flow or forced convective boiling



شکل ۱ نمودار شار گرمایی بر حسب اختلاف دما در فرآیند جوشش

هنگامی که میزان ΔT افزایش می یابد، منحنی ۴ رژیم متفاوت جوشش استخری را می پیماید. ۱) جابجایی آزاد[1]، ۲) جوشش هسته ای[2]، جوشش انتقالی[3] و جوشش فیلمی[4] (لایه ای).

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تا نقطه A رژیم جابجایی آزاد حاکم است که هنگامی اتفاق می افتد که بخار کافی برای ایجاد جوشش فعال وجود ندارد. اختلاف دمای کوچکی در مایع وجود دارد و گرمای منتقل شده از سطح گرمایش با جابجایی آزاد از سطح آزاد خارج می شود. در نقطه A حباب های مجزا برای اولین بار در طول سطح گرمایش پدیدار می شوند و این نقطه به عنوان شروع جوشش هسته ای[5] شناخته می شود. جوشش هسته ای بین نقطه A و C اتفاق می افتد. در این رژیم، حباب های مجزا ظاهر می شوند و گرما به طور عمده از سطح به مایع منقل می شود. هنگامی که ΔT افزایش می یابد (B-C)، مکان های هسته ای بیشتری فعال می شوند و حباب ها مخلوط و به هم پیوسته شده و ستونی از بخار تشکیل می دهند. در نقطه C شار گرمایی بیشینه یا شار گرمایی بحرانی[6] اتفاق می افتد. بین نقطه C و D جوشش انتقالی رخ می دهد، که یک لایه ناپایدار بخار روی سطح گرمایش تشکیل شده و شرایط بین جوشش هسته ای و فیلمی نوسان میکند. تشکیل حباب متناوب، مایع(رسانش بالاتر) را از تماس با سطح مسدود می کند (کاهش یافتن شار گرمایی سطح). جوشش فیلمی در آن سوی نقطه D رخ می دهد. علاوه بر جابجایی و رسانش، انتقال گرما بوسیله تشعشع در این سطح فوق گرم شدن زیاد دیواره نقش مهمی پیدا می کند. یک فیلم بخار پایدار سطح را در این رژیم می پوشاند.

فاکتور های متعددی در فرآیند جوشش وجود دارد مثل: شرایط سطحی کانال یا هیتر (صافی و زبری)، ابعاد هیتر، شکل، ماده، قطر و جهت گیری آن، میزان تر شدن[7] سطح، مادون سردی، خواص سیال مؤثر بر عملکرد انتقال گرما، دینامیک حباب ها در جوشش جریانی و استخری. این فاکتورها هم به صورت تئوری و هم آزمایشگاهی مطالعه شده اند [۴-۹].

۳- انتقال حرارت جوششی نانوسیال ها

در کاربردهای نانوسیال ها، انتقال حرارت جابجایی با یا بدون تغییر فاز بسیار مورد تحقیق قرار گرفته است. هرچند همانند تحقیقات بر روی خواص مؤثر، این نتایج به صورتی نیستند که بشود از آنها نتیجه گیری کلی کرد. در انتقال حرارت جوشش استخری نتایج متناقضی گزارش شده است. در مقایسه با این نتایج متناقض، مشاهدات سازگاری در مورد بهبود CHF با استفاده از نانوسیال ها گزارش شده است.

یکی از علل این تناقضات مسئله همگن بودن نانوسیال در تمام زمان آزمایش است. بیشتر نانوسیال های مورد استفاده در آزمایش جوشش تمایل به عدم ثبات دارند و در دماهای بالا به علت معیوب شدن همگن کننده[8] ذرات نانو و همگن گننده می توانند متراکم و روی سطح گرمایش ته نشین شوند که این اتفاق یقیناً باعث تغییر در سطح می شود تأثیرات پیش بینی نشده ای را به وقوع می رساند شامل تغییرات حفره های فعال در ایجاد حباب، تغییر قابلیت تر شدن، تشکیل مقاومت حرارتی بیشتر روس سطح که مانع از تماس مستقیم مایع و سطح جوشش می شود.

۴- روابط انتقال حرارت جوششی نانو سیال ها

اگرچه روابط متعددی برای پیش بینی کردن ضریب انتقال حرارت جوششی و شار گرمایی بحرانی وجود دارد، محققانی که روی انتقال حرارت جوششی با نانوسیال ها کار می کنند به طور

[1] Free convection
[2] Nucleate boiling
[3] Transition boiling
[4] Film boiling
[5] Onset of nucleate boiling(ONB)
[6] Critical heat flux (CHF)
[7] Wetting
[8] Stabilizer

عمده، از دو رابطه خیلی مشهور روهسنو[1] [۱۰] و زوبر[2] [۱۱] برای مقایسه دیتاهای تجربی استفاده می کنند.

بر اساس آنالیز ابعادی همه فاکتورهای مرتبط در جوشش هسته ای و نتایج تجربی در یک محدوده وسیع از شرایط گوناگون، روهسنو یکی از اولین و پر کاربردترین روابط جوشش را ارائه کرد، که به فرم زیر معمولاً نمایش داده می شود.

$$\frac{C_P(T_W-T_S)}{h_{fg}} = C_{sf}\left[\frac{q''}{\mu h_{fg}}\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho-\rho_g)}}\right]^{0.33}\left(\frac{C_P\mu}{k}\right)^n \quad (۱)$$

که $C_P, h_{fg}, T_W, T_S, q'', \mu, \rho, \rho_g, \sigma, g, k$، به ترتیب از چپ به راست عبارتند از: گرمای ویژه مایع، گرمای نهان مایع، دمای دیواره هیتر، دمای اشباع مایع، شار حرارتی، ویسکوزیته مایع اشباع، دانسیته مایع اشباع، دانسیته بخار اشباع، شتاب جاذبه، رسانش گرمایی مایع. مقدار ضریب تجربی C_{sf} و نمای n، برای ترکیب های متفاوت سیال-سطح تغییر میکنند و می توان آن ها را پیدا کرد [۱۲]. مثلاً C_{sf} و n برای ترکیب آب-پلاتین به ترتیب ۰/۰۱۳ و ۱ هستند.

شار گرمایی بیشینه قابل حصول در رژیم جوشش هسته ای استخری، شار گرمایی بحرانی یا نقطه عبور از جوشش هسته ای است. یک رابطه بسیار پر کاربرد که CHF جوشش استخری را برای یک سطح گرمایش تخت نامتناهی پیش بینی می کند رابطه زوبر است. که CHF زوبر به صورت زیر نشان داده می شود:

$$q''_{CHF} = K\rho_g^{1/2}h_{fg}\left[g\sigma(\rho-\rho_g)\right]^{1/4} \quad (۲)$$

مقدار ثابت K، از ۰/۱۳۸ تا ۰/۱۵۷ تغییر می کند. هرچند بر اساس ساده کردن آنالیز فرمول بندی زوبر آن را ۰/۱۳۱ در نظر گرفته و پیشنهاد داد.

این روابط هرچند بسیار پرکاربرد هستند در برخی موارد با نتایج تجربی همخوانی ندارند [۱۳, ۱۴]. بنابراین نیاز فراوانی به گسترش روابط جدید و یا اصلاح این روابط کلاسیک وجود دارد.

۵- سیال های مغناطیسی

سیال مغناطیسی یا فروفلوید یک محلول کلوئیدی از ذرات بسیار ریز مغناطیسی پوشش داده شده (با ابعاد ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر) در سیال حاملی مثل آب، هیدروکربن ها، فلوروکربن ها و غیره است. سیالات مغناطیسی همزمان خواص سیال و مغناطیس را دارند. نانوسیال های مغناطیسی کاربردهای عملی مهندسی بسیاری دارند [۱۵]، از جمله آب بندی (درزبندی)، بیرینگ، دمپر، تبدیل انرژی و غیره. سیالات مغناطیسی می توانند باعث بهبود مؤثر انتقال حرارت شده و با بکارگیری یک میدان مغناطیسی کنترل شوند. تعداد بسیار زیادی از محققان در زمینه انتقال حرارت جابجایی سیالات مغناطیسی کار کرده اند در حالی که تنها تعداد اندکی تحقیق روی انتقال حرارت جوششی آن ها انجام شده است [۱۶-۱۸].

جانهونگ و همکارانش [۱۹] جوشش در آب و سیال مغناطیسی (با پایه آب) را در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی بررسی کردند، در این آزمایش، میله گرمادهنده به صورت عمودی در ظرف قرار دارد، که نتایج اصلی زیر حاصل شدند:

- در مقایسه با آب در همان شار گرمایی، ضریب انتقال حرارت جوششی سیال مغناطیسی آب پایه در غیاب میدان مغناطیسی افزایش می یابد و هنگامی که میدان مغناطیسی حاکم می شود بیشتر هم می شود.
- بهبود انتقال حرارت جوششی سیال مغناطیسی در غیاب میدان مغناطیسی نتیجه استفاده از نانو ذرات و پوشش دهنده هاست.
- قطر انحراف حباب ها کاهش می یابد هنگامی که یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت به کار برده می شود. به علاوه حباب ها در وسط باریک تر و در ته پهن تر می شوند که باعث می شود حباب ها رشد سریعتری داشته باشند. بنابراین بهبود انتقال گرمای جوششی نانوسیال ها در حضور میدان مغناطیسی به علت اثر قوی میدان مغناطیسی روی حباب ها است.

۶- نتیجه گیری

انتقال گرمای جوششی در نانوسیالات به علت کاربرد فراوان در شاخه های مختلف، بسیار مهم است که نسبت به بررسی رسانش گرمایی در مقالات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در زمینه بهبود یا بدتر کردن انتقال گرمای جوششی نانوسیال ها

[1] Rohsenow
[2] Zuber

نسبت به سیال خالص تناقض بسیار است و نتایج متفاوتند، اما به هر حال طبق نتایج تجربی، شار گرمایی بحرانی که یکی از مهمترین فاکتورها در جوشش است با بکارگیری نانوسیال ها بهبود می یابد. روابط تجربی، تأثیر فاکتورهای گوناگون و . . . در جوشش نانوسیال ها کماکان به تحقیقات و آزمایشات گسترده نیازمند است. انتقال حرارت در سیالات مغناطیسی با کنترل میدان مغناطیسی اعمال شده می تواند بهبود یابد.

۷- مراجع

[1] Y. M. Yang, J. R. Maa, Boiling of suspension of solid particles in water, International journal of heat and mass transfer, Vol. 27, No. 1, pp. 145-147, 1984.

[2] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al2O3, SiO2 and TiO2 ultra-fine particles, 1993.

[3] S. U. Choi, J. A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), pp. 1995.

[4] L. S. Tong, Y. S. Tang, Boiling heat transfer and two-phase flow: Routledge, 2018.

[5] I. Pioro, W. Rohsenow, S. Doerffer, Nucleate pool-boiling heat transfer. I: review of parametric effects of boiling surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, No. 23, pp. 5033-5044, 2004.

[6] I. Pioro, W. Rohsenow, S. Doerffer, Nucleate pool-boiling heat transfer. II: assessment of prediction methods, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, No. 23, pp. 5045-5057, 2004.

[7] M.-G. Kang, Experimental investigation of tube length effect on nucleate pool boiling heat transfer, Annals of Nuclear Energy, Vol. 25, No. 4-5, pp. 295-304, 1998.

[8] M.-G. Kang, Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer, International journal of heat and mass transfer, Vol. 43, No. 22, pp. 4073-4085, 2000.

[9] M.-G. Kang, Effects of tube inclination on pool boiling heat transfer, Nuclear Engineering and Design, Vol. 220, No. 1, pp. 67-81, 2003.

[10] W. M. Rohsenow, A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 74, No. 6, pp. 969-975, 1952.

[11] N. Zuber, Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer: United States Atomic Energy Commission, Technical Information Service, 1959.

[12] I. Pioro, Experimental evaluation of constants for the Rohsenow pool boiling correlation, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 42, No. 11, pp. 2003-2013, 1999.

[13] D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ-alumina nanofluids, Journal of Nanoparticle Research, Vol. 7, No. 2, pp. 265-274, 2005.

[14] P. Vassallo, R. Kumar, S. D'Amico, Pool boiling heat transfer experiments in silica–water nano-fluids, International journal of heat and mass transfer, Vol. 47, No. 2, pp. 407-411, 2004.

[15] K. Nakatsuka, Trends of magnetic fluid applications in Japan, Journal of magnetism and magnetic materials, Vol. 122, No. 1-3, pp. 387-394, 1993.

[16] M. Takahashi, K. Shinbo, R. Ohkawa, M. Matsuzaki, A. Inoue, Nucleate pool boiling heat transfer of magnetic fluid in a magnetic field, Journal of magnetism and magnetic materials, Vol. 122, No. 1-3, pp. 301-304, 1993.

[17] V. Bashtovoi, G. Challant, O. Y. Volkova, Boiling heat transfer in magnetic fluids, Journal of magnetism and magnetic materials, Vol. 122, No. 1-3, pp. 305-308, 1993.

[18] S. Kamiyama, J. Ishimoto, Boiling two-phase flows of magnetic fluid in a non-uniform magnetic field, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 149, No. 1-2, pp. 125-131, 1995.

[19] L. Junhong, G. Jianming, L. Zhiwei, L. Hui, Experiments and mechanism analysis of pool boiling heat transfer enhancement with water-based magnetic fluid, Heat and mass transfer, Vol. 41, No. 2, pp. 170-175, 2004.