

بررسی تجربی اثر استفاده از نانوسیال بر پایه کربن بر ضریب انتقال حرارت و دمای

میله‌های سوخت در لوپ تحت فشار آزمایشگاهی

INC29-1210

محسن علی زاده افروزی*، حانیه حسین زاده بنهنگی، محمدرضا عباسی

گروه رآکتور دانشکده مهندسی هسته‌ای دانشگاه شهید بهشتی - ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، تهران، ایران.

چکیده:

مفهوم نانوسیال، سوسپانسیون‌های حاوی نانوذره‌های فلزی و غیرفلزی را شامل می‌شود که از آن‌ها به‌عنوان خنک‌کننده در راکتورهای هسته‌ای استفاده می‌شود، زیرا در مقایسه با سایر مواد، مقاومت حرارتی پایین‌تر و خواص انتقال حرارت بهبودیافته‌ای دارند. در گذشته تحقیقاتی بر روی نانوذره‌های فلزی برای افزایش بازده حرارتی راکتورها انجام شده است. در این مقاله تغییرات ضریب انتقال حرارت با افزودن نانولوله‌های کربنی (Cnt) با درصدهای حجمی مختلف به آب دی یونیزه بررسی شده است. نانوسیال تولیدشده به‌عنوان خنک‌کننده در مدار اول لوپ آزمایشگاهی بکار می‌رود. نتایج تجربی در حالت‌های مختلف (سرعت سیال و فشار سیستم) استخراج گردیده است. همچنین مدار ترموهیدرولیکی آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار تجاری Ansys cfx شبیه‌سازی شده و به کمک تئوری‌های موجود درباره‌ی خواص نانو سیال، پارامترهای سیستم محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است تا صحت محاسبات تأیید گردد. **کلیدواژه‌ها:** نانوسیال Cnt، نانولوله کربنی، ضریب انتقال حرارت جابجایی، نرم‌افزار Ansys cfx.

Experimental investigation of the effect of using carbon-based nanofluid on the heat transfer coefficient and the temperature of fuel rods in a loop under laboratory pressure

M. Alizadeh afrooz^{*}, H. Hosseinzadeh benhangi, M.R. Abassi

1. Reactor Faculty of Shahid Beheshti University, 1983969411, Tehran, Iran

Abstract:

The concept of nanofluid includes suspensions containing metallic and non-metallic nanoparticles, which are used as coolants in nuclear reactors, because compared to other materials, they have lower thermal resistance and improved heat transfer properties. In the past, research has been done on metal nanoparticles to increase the thermal efficiency of reactors. In this article, the changes in the heat transfer coefficient by adding carbon nanotubes (CNT) with different volume percentages to deionized water have been investigated. The produced nanofluid is used as a coolant in the first circuit of the laboratory loop. Experimental results have been extracted in different states (fluid velocity and system pressure). Also, the laboratory thermohydraulic circuit has been simulated with ANSYS CFX commercial software and with the help of existing theories about nanofluid properties, system parameters have been calculated and compared with laboratory results to confirm the correctness of the calculations.

Keywords: Cnt nanofluid, Carbon nanotube, Displacement heat transfer coefficient, Ansys cfx software

۱. مقدمه

فناوری نانو در ساده‌ترین حالت این‌گونه تعریف می‌شود: بررسی مواد در ابعاد اتمی یا مولکولی در مقیاس یک میلیاردم آن. فناوری نانو توصیف همه‌جانبه‌ی فعالیت‌هایی است که با دست‌کاری در کوچک‌ترین جزء ماده یعنی اتم، باعث می‌شود که به خواص خارق‌العاده‌ی آن دست‌یابیم. این فناوری در سال ۱۹۵۹ پدید آمد. ریچارد فایمن، برنده‌ی جایزه‌ی نوبل، در نطق مشهورش تحت عنوان «آن پایین فضای بسیاری وجود دارد»، انقلاب نانو را آغاز کرد. یک سال بعد، یعنی سال ۱۹۶۰، راجر بیکن به تشریح خصوصیات نانولوله پرداخت. در سال ۱۹۸۵ نیز ریچارد اسمالی ساختار باکی بال را به کمک لیزر ساخت. سرانجام در سال ۱۹۹۱ سومیو ایجیما در مؤسسه‌ی NEC^۱ به نانولوله‌ی چند جداره دست‌یافت و آغازگر واقعی فناوری نانو شد. اینک در سرتاسر دنیا بیش از ۲۰۰۰ شرکت فعال در اندیشه‌ی تولیدات مفیدی در عرصه‌ی نانو تکنولوژی هستند. [۱]

با پخش کردن ذرات با اندازه نانومتر (نانو مواد) در سیال، نوع جدیدی از سیال به وجود می‌آید که نانو سیال نامیده می‌شود. نانو سیالات طبقه‌ی جدیدی از سیالات انتقال حرارت می‌باشند که از طریق معلق سازی نانو ذرات در درون سیالات معمولی و متداول انتقال حرارت می‌باشند که به‌عنوان سیال پایه شناخته می‌شوند به دست می‌آیند [۲]. کاهش اندازه ذرات یک جامد که توأم با افزایش تعداد آن‌ها در واحد جرم هست، منجر به افزایش سطح مخصوص می‌گردد. به طوری که سطح مخصوص ذراتی با اندازه نانومتری در حدود ۱۰۰۰ برابر سطح مخصوصی ذراتی با ابعاد میکرومتر می‌باشد. با کاهش ذرات به حدود نانومتر درصد بیشتری از اتم‌های آن در نزدیکی سطح قرار می‌گیرند. سطح ذرات در انتقال حرارت مؤثر بوده و استفاده از نانو سیال به افزایش سطح انتقال حرارت منجر می‌گردد. نانو ذرات به کار گرفته شده یک سطح بسیار زیاد برای موضوع انتقال حرارت ایجاد می‌کند و همین عامل یک مزیت بالقوه برای نانو سیال می‌باشد. مقایسه سطح ایجاد شده برای انتقال حرارت در نانو ذرات با سطح پودرهای متداول میکرومتری بیانگر توانایی و قابلیت زیاد نانو ذرات در افزایش انتقال حرارت و ایجاد سوسپانسیون پایدار می‌باشد. کاهش توان لازم برای پمپاژ سیال، کاهش گرفتگی و انسداد مجاری، کاهش اندازه دستگاه‌های انتقال حرارت و کاهش هزینه‌ها از جمله مزایای استفاده از نانو سیال‌ها می‌باشد.

نانو سیال‌های آبی به‌عنوان خنک‌کننده‌ای بالقوه برای کاربردهای هسته‌ای محسوب می‌شوند [۲]. وجود نانو ذرات انتقال انرژی را افزایش می‌دهد که ناشی از رسانندگی و ضریب انتقال انرژی بالاتر نانو سیال نسبت به سیال پایه است. در یک وضعیت جوشش استخری با داشتن غلظت بسیار کمی از نانو ذرات Al_2O_3 و یا SiO_2 (غلظت کمتر از ۰/۰۰۱٪) تا ۲۰۰ درصد افزایش در شار حرارتی بحرانی گزارش شده است. مطالعات تحلیلی نشان داده‌اند که استفاده از نانو سیال به‌عنوان خنک‌کننده در یک راکتور PWR باعث افزایش چگالی شار حرارتی تا ۴۰ درصد و شار حرارتی بحرانی تا ۳۰ درصد می‌شود [۳].

مطالعات تجربی صورت گرفته بر روی نانو سیال‌ها از گستردگی بسیار بالایی برخوردار است. از جمله جدیدترین مطالعات صورت گرفته می‌توان به مطالعه تجربی ابراهیم گاربادین [۴] اشاره کرد. او در یک محفظه مربعی شکل انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانولوله کربنی چند دیواره با سیال پایه آب را بررسی کرده است [۵].

معرفی نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین ساختارهای کربنی می‌باشند که اخیراً کشف شده‌اند. آن‌ها از خواص و ویژگی‌های منحصر به فردی برخوردار هستند. ساختار آن به شکل استوانه‌های توخالی می‌باشد که دیواره‌های این استوانه را اتم‌های کربن تشکیل داده‌اند. نحوه استقرار اتم‌ها و پیوند بین آن‌ها، در این دیواره‌ها دقیقاً شبیه به ساختار اتمی (لایه‌های) گرافیت می‌باشد. به عبارت دیگر دیواره نانولوله‌های کربنی عبارت است از شش ضلعی‌های منظم و پیوسته کربنی؛ با توجه به این تعریف می‌توان گفت که نانولوله‌های کربنی از لوله شدن و پیچش صفحات گرافین تولید می‌شوند.

¹Nippon Electric Company

در یک تقسیم‌بندی کلی نانولوله‌های کربنی را می‌توان به دو گروه اصلی نانولوله‌های کربنی تک دیواره (SWCNTs) و نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) دسته‌بندی کرد. طول هر دو نوع نانولوله‌های تک دیواره و چند دیواره تا به حال از چند میکرون تجاوز نکرده است [۵].

روش تهیه نانوسیال

نانوسیال در غلظت‌های مختلف و به میزان موردنیاز و به به روش دومرحله‌ای تولید شود. نانو سیالات حاوی نانولوله‌های کربنی چند دیواره در سه غلظت حجمی متفاوت یعنی ۰/۰۴٪ و ۰/۰۲٪ و ۰/۰۰۲٪ در سیال پایه آب دی یونیزه تهیه شدند. حجم نانوسیال ساخته شده حدود ۲۸ لیتر می‌باشد که معادل با مقدار بکار رفته در آزمایش است. در این پژوهش برای تولید نانوسیال، از نانولوله‌های کربنی که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات نانو ذرات مورد استفاده.

| اندازه | کمیت |
|---------------------------|----------------------|
| پودری سیاه‌رنگ | مشخصات ظاهری و عمومی |
| بیش از ۹۵ درصد | خلوص |
| ۲/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب | چگالی نانو ذرات |
| ۱۰ تا ۲۰ نانومتر | قطر ذرات |
| ۳۰ میکرومتر | طول ذرات |

جهت ایجاد پایداری ترمودینامیکی نانولوله‌های کربنی در داخل نانوسیال از سورفکتانت سدیم دودسیل بنزن سولفات استفاده گردید. به منظور پراکنده شدن بهتر نانوذرات در سیال پایه نیز از حمام آلتراسونیک استفاده شد. در این پژوهش برای حصول اطمینان از پایداری نانوسیال تهیه شده از دستگاه زتا پتانسیل استفاده گردید که در هر سه مورد این پایداری مشاهده گردید. نتایج تست آنالیز پتانسیل زتا برای هر سه حالت در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. نتایج تست آنالیز پتانسیل زتا برای مدت زمان آلتراسونیک مختلف.

| نتیجه تست | پتانسیل زتا (mV) | زمان آلتراسونیک | نمونه |
|-----------|------------------|-----------------|-------|
| Good | -۳۳ | ۳۰ | a |
| Good | -۴۵/۸ | ۶۰ | b |
| Good | -۶۷/۹ | ۹۰ | c |

۲. نحوه انجام آزمایش

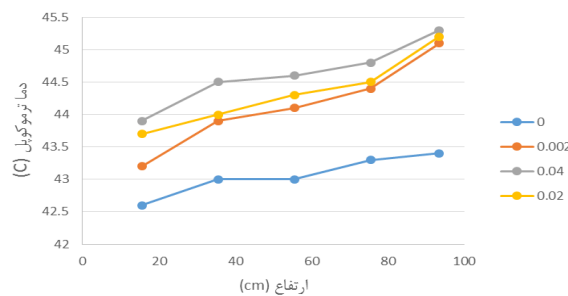
به منظور بررسی جریان داخل محفظه آزمایش به صورت تجربی، از یک مدار ترموهیدرولیکی تحت فشار بسته مشابه سیکل ترموهیدرولیکی نیروگاه‌های اتمی استفاده شده است. لوپ این آزمایش دارای دو مدار می‌باشد. مدار اول مربوط به جریان عبوری از محفظه آزمایش و مدار دوم مربوط به جریان ثانویه عبوری از مبدل و رادیاتور می‌باشد. مدار اول چرخه‌ای کاملاً بسته می‌باشد و جریان سیال خنک خروجی از مبدل وارد پمپ شده و پس از آن با عبور از شیرها، وارد محفظه آزمایش شده و گرم می‌شود. جریان خروجی از محفظه آزمایش پس از طی مسیر وارد مبدل گردیده و با دادن حرارت خود به سیال جاری در مدار ثانویه خنک گردیده و دوباره همین چرخه تکرار می‌گردد. با توجه به وجود نواحی آزمایشی مختلف و لزوم انجام آزمایش در دبی‌های مختلف از پمپ سانتریفیوژی در سیکل استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری دما در نواحی آزمایش ترموکوپل‌هایی در هر یک از نواحی آزمایش قرار گرفته‌اند. به منظور اندازه‌گیری فشار در نواحی مختلف از جمله در خروجی و ورودی محفظه آزمایش، دو عدد فشارسنج نصب شده است. ابزار دقیق این سیستم شامل

ترموکوپل، ترانسدیوسر فشار و یک فلومتر می‌باشد که PLC موردنظر باید توانایی دوده‌گیری در هر ۰/۱ ثانیه را دارا باشد.

۳. نتایج تجربی و عددی آزمایش

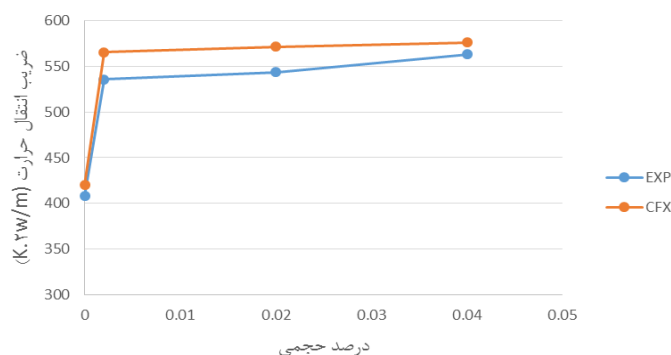
در این قسمت بخشی از نتایج تجربی به‌دست‌آمده در آزمایش‌ها و همچنین نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار CFX برای بررسی تأثیر CNT بر روی خواص حرارتی نانو سیال آورده شده است. هدف اصلی استفاده از نانو سیال در سیکل حرارتی، افزایش انتقال حرارت از منبع گرما به سیال و کاهش دمای میله‌ی سوخت می‌باشد. بدین علت بالاتر بودن دمای نهایی سیال در محفظه نشان از خصوصیات بهتر سیال برای انتقال حرارت است. در این بخش به مقایسه توزیع محوری دمای سیال در ارتفاع‌های مختلف محفظه آزمایش با افزایش میزان غلظت CNT در سیال پرداخته می‌شود.

در شکل ۱ توزیع محوری دما در فشار سه بار و دبی حجمی ۱۴۳۵ لیتر بر ساعت آورده شده است. همان‌طور که در نتایج قابل‌مشاهده است با افزایش درصد حجمی CNT دمای نهایی کل سیال افزایش یافته است که نشان از انتقال حرارت بهتر در شرایط مساوی با افزایش ذرات CNT در پایه سیال آب دارد.



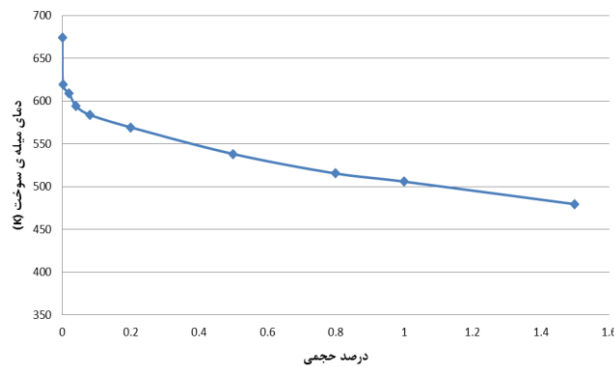
شکل ۱. توزیع محوری دما در محفظه آزمایش.

ضریب انتقال حرارت جابجایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارهای میزان انتقال حرارت در سیال‌های مختلف است در نتیجه افزایش این ضریب به معنای افزایش کارایی سیال در انتقال حرارت و در نتیجه بالا رفتن بازدهی کل سیکل خواهد بود. شکل‌های ۲ و ۳ نشان‌دهنده نتایج حاصل از مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده آزمایشگاهی با داده‌های شبیه‌سازی شده در CFX می‌باشد که برای آب و نانوسیال رسم شده‌اند. در این نمودارها تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب غلظت‌های مختلف CNT در نانوسیال در فشار ۳ بار نشان داده شده است.



شکل ۲. مقایسه ضریب انتقال حرارت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی.

همچنین برای این که روند تغییرات ضریب انتقال حرارت با افزایش درصد حجمی نانوذره مشخص شود شبیه‌سازی عددی در CFX برای غلظت‌های بالاتر از ۰,۰۴ انجام گرفته است که در شکل ۳ تغییرات دمای سطح میله‌ی سوخت با افزایش غلظت نانوسیال نمایش داده شده است.



شکل ۳. تغییرات دمای میله سوخت با افزایش درصد حجمی نانوسیال.

نتایج نشان‌دهنده کاهش سریع دمای سطح سوخت با افزایش مقدار کمی از غلظت نانوسیال می‌باشد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش مدار ترموهیدرولیکی بیانگر افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و کاهش دمای سطح سوخت با افزایش درصد حجمی نانوذرات می‌باشد. ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال نسبت به سیال پایه بیشتر است. در حقیقت با افزایش درصد حجمی نانوذرات برداشت انرژی بهتر صورت می‌پذیرد. این افزایش به دبی جریان و غلظت نانوسیال بستگی دارد و در همه‌ی موارد با افزایش رینولدز، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب انتقال حرارت ایجادشده به وسیله افزایش درصد نانو سیال در سیستم، دمای نهایی میانگین کل محفظه آزمایش نیز افزایش یافت که نتیجه آن بالا رفتن بهره‌وری کل سیکل خواهد بود. حداکثر خطا بین نتایج عددی و شبیه‌سازی ۰.۴٪ به دست آمده است.

۵. مراجع

- [1] Ratner, M.A. and D. Ratner, Nanotechnology: A gentle introduction to the next big idea. Prentice Hall Professional, 2003
- [2] Etemad, S.G., A. Mujumdar, and R. Nassef, Simultaneously developing flow and heat transfer of non-Newtonian fluids in equilateral triangular duct. Applied mathematical modeling, vol. 20, pp. 1059-1068, 1996
- [3] Abbassi, Y., et al., Experimental investigation of TiO₂/Water nanofluid effects on heat transfer characteristics of a vertical annulus with non-uniform heat flux in non-radiation environment. Annals of Nuclear Energy, vol 69, pp. 7-13, 2014
- [4] You, S., J. Kim, and K. Kim, Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer. Applied Physics Letters, vol. 83, pp. 3374-3376, 2003
- [5] Ding, Y., et al., Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp. 240-250, 2006