

Experimental Investigation of Nanofluid Based on Titanium Dioxide Nanoparticles in Absorption Sunlight and Steam Generation

ARTICLE INFO

Article Type Original Research

Authors

Ghafurian M.M.¹ *PhD,* Niazmand H. *¹ *PhD,* Moallemi A. E. ¹ *BSc,* Tavakoli Dastjerd F.¹ *PhD*

How to cite this article

Ghafurian M.M, Niazmand H, Moallemi A. E, Tavakoli Dastjerd F. Experimental Investigation of Nanofluid Based on Titanium Dioxide Nanoparticles in Absorption Sunlight and Steam Generation. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):57-65.

ABSTRACT

In the present research, the steam generation performances of nanofluids containing titanium dioxide have experimentally been examined. For this purpose, a solar simulator with a xenon lamp as the radiation source, and a pyranometer as a light intensity measuring device are used. Then, the water based-nanofluids in five nanoparticle mass fractions of 0.001, 0.002, 0.004, 0.04, and 0.08% exposed to the light intensity of 3.5Suns (3.5 kW/m2) were investigated to compare their evaporation performances with water (H2O). Finally, the effects of the solar power intensity on the steam generation were examined. The results showed that the titanium dioxide nanostructures are more efficient to directly absorb the solar energy than the water so that the maximum total evaporation efficiency of 77.4% and 54% were obtained at 3.5 kW.m-2 for nanofluid and water, respectively. Furthermore, it was found that light absorption increases as the nanofluid mass fraction increases. Also, increasing the light intensity from 1.5 to 3.5 kW.m-2 enhances the thermal efficiency, while it reduces the evaporation efficiency.

Keywords Steam Generation; Nanofluid; Titanium Dioxide; Solar

CITATION LINKS

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Postal Code: 9177948944 Phone: +98 (51) 38805103 Fax: +98 (51) 3880500 niazmand@um.ac.ir

Article History Received: November 10, 2018 Accepted: May 7, 2019 ePublished: January 1, 2020 [1] Localized solar heating via graphene oxide nanofluid for direct steam generation [2] New approach for estimating the cooling capacity of the absorption and compression chillers in a trigeneration system [3] Volumetric solar heating of nanofluids for direct vapor generation [4] Synchronous steam generation and heat collection in a broadband Ag@ TiO2 core-shell nanoparticle-based receiver [5] Solar vapor generation enabled by nanoparticles [6] Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles [7] Photothermal conversion efficiency of nanofluids: An experimental and numerical study [8] Efficient steam generation by inexpensive narrow gap evaporation device for solar applications [9] Solar evaporation via nanofluids: A comparative study [10] Investigation of graphene nanofluid for high efficient solar steam generation [11] Performance evaluation of multi-wall carbon nanotube in solar fresh water production [12] Steam generation in a nanoparticle-based solar receiver [13] Direct vapor generation through localized solar heating via carbon-nanotube nanofluid [14] Investigation on enhancing effects of Au nanoparticles on solar steam generation in graphene oxide nanofluids [15] Recyclable Fe3O4@CNT nanoparticles for high-efficiency solar vapor generation [16] 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination [17] Bioinspired multifunctional paper-based rGO composites for solar-driven clean water generation [18] Bioinspired bifunctional membrane for efficient clean water generation [19] Effect of sonication time on the evaporation rate of seawater containing a nanocomposite [20] Performance evaluation of Ferric oxide (Fe3O4) and Graphene nanoplatelet (GNP) nanoparticles in solar steam generation [21] Hollow carbon beads for significant water evaporation enhancement [22] Volumetric solar heating and steam generation via gold nanofluids [23] The beer-lambert law [24] Improving steam generation and distilled water production by volumetric solar heating

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

ارزیابی تجربی نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید **(TiO**2) در جذب نور خورشید و تولید بخار

محمدمصطفى غفوريان PhD

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

حميد نيازمند^{*} PhD

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران امیراسماعیل معلمی BSc

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران **فاطمه توکلی دستجرد PhD**

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیدہ

> تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۷ ^{*}نویسنده مسئول: niazmand@um.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه کاربرد مواد نانوساختار با خاصیت اپتیکی مناسب، توجه ویژه محققان را در پدیدههای فتوکاتالیست و فتوولتاییک به خود معطوف نموده است. اما در دهه اخیر کاربرد نانوذارت با خاصیت جذب نور بالا در تولید بخار خورشیدی، بهعنوان بهترین کیفیت گرما، توجه بیشتری یافته است؛ زیرا بهکارگیری تکنولوژی استفاده از نانوذرات جهت برداشت انرژی خورشید میتواند یکی از موثرترین و مفیدترین روشهای صرفهجویی در منابع سوخت فسیلی و کاهش آلودگی باشد. در حقیقت با تولید بخار از یک منبع انرژی تجدیدپذیر، پاک و در دسترس میتوان بخش عمدهای از نیازهای مصرفی بشر را بدون تولید آلاینده زیست محیطی، تأمین نمود^[1, 1]. از طرفی هزینههای اولیه، بهرهبرداری و ذخیرهسازی این نوع انرژی، استفاده از آن را با چالش جدی روبهرو کرده است. اصولاً در سیستمهای

سنتی برداشت انرژی خورشید، تلفات گرمایی زیادی در مرحله برداشت انرژی و انتقال آن صورت میگیرد. از این رو پژوهشگران بهدنبال راه حلی برای کاهش اتلافات و افزایش جذب و برداشت مستقیم انرژی خورشیدی هستند^[3,4].

نانوذرات با جذب انرژی نور و محلیسازی آن باعث افزایش دمای سیال اطراف و درصورت تداوم انرژی مناسب، باعث تولید بخار خواهند شد. این ادعا توسط محققانی نظیر *نیومن* و همکاران^[5,6]، با عنوان تولید بخار خورشیدی با استفاده از نانوتکنولوژی اثبات شده است. نتایج آنها نشان داد که برای تولید بخار مستقیم با بازدهی ۲۶% در اطراف نانوذرات طلا، انرژی چند برابر انرژی خورشید نیاز است. هر چند تأمین این انرژی بسیار مشکل است، اما درصورت بهینهسازی سیستم برداشت انرژی، میتوان بخش اعظمی از اتلافات انتقال انرژی را کاهش داد.

از جمله پژوهشهای دیگر انجامشده در این زمینه میتوان به یژوهش جین و همکاران^[7] اشاره نمود. آنها با مطالعه آزمایشگاهی و عددی نشان دادند که استفاده از نانوسیال طلا با غلظت ٥/٨ppm سبب بهبود راندمان تبدیل نور به گرما بهمیزان ٦٠% نسبت به آب خالص در شدت یکسان میشود. همچنین *مورچیانو* و همکاران^[8] و *زینی* و همکاران^[9] در پژوهش خود با اشاره به قیمت بالای نانوسیال طلا (که برای ۲۰میلیلیتر محلول آبی نانوذره طلا با غلظت ۱/۸×۱۰^۱ ذره در میلیلیتر، برابر با ۱۸۵ دلار آمریکا است)، بهرهگیری از آن را در تولید بخار خورشیدی از نظر اقتصادی توجیهیذیر ندانستند. بهطوری که مقایسه عملکرد نانوسیال طلا با دیگر نانوسیالها نظیر کربن سیاه، نشان داد که قیمت بخار تولیدشده توسط نانوذرات طلا ۳۰۰ برابر بخار تولیدشده با کربن سیاه است. از این رو توجه محققان به نانوذرات ارزانقیمت با قابلیت جذب نور بالا متمرکز شد. بهعنوان نمونه *لئو* و همکاران^[10] و *غفوریان* و همكاران^[1,11] بهترتیب نانوذرات اكسید گرافن كاهش یافته، اكسید گرافن و کربن نانوتیوب را بهمنظور بررسی اثر غلظت نانوسیال و شدت تابش نور ورودی بر نرخ تبخیر، بازده تبخیری و نیز بازده تبدیل نور به گرما به کار گرفتند. این سه تحقیق نیز عملکرد بالای نانوسیالهای کربنی را حتی در غلظتهای پایین (۲۰ تا ۸۰ppm^[10] و ۰/۰۰٤[1,11] درصد وزنی)، در مقایسه با آب خالص گزارش نمودند. *نی* و همکاران^[3]، در یک مطالعه مقایسهای، اثر نانوسیالهای کربن سیاه، کربن سیاه گرافیتیشده و گرافن در تولید بخار خورشیدی مورد ارزیابی قرار دادند و در این میان به بازده مطلوب ۲۹% دست ىافتند.

از دیگر پژوهشهای انجامشده در این زمینه میتوان به *جین* و همکاران^[12]، *وانگ* و همکاران^[13]، *فو* و همکاران^[14] و *شی* و همکاران^[15] اشاره کرد که مطالعاتی روی نانوذرات کربنی، طلا، نانولوله کربنی تکدیواره و چند دیواره اصلاحشده با عامل کربوکسیلی و گرافن در جهت تولید بخار خورشیدی انجام دادهاند⁻¹² ^[15]. آنها بازده کل ۸۰/۳%، مربوط به شدت بالای ۲۲۰Suns و مبتنی بر نانوسیال طلا را گزارش نمودند^[12]. درحالی که بازده

تبخیری، برای دیگر نانوسیالها ۶۶%^[4]، ۶۰%^[15]، ۶۹%^[3] و ۴۵%^[13] و در شدت بالای Suns ۱۰ گزارش شده است.

بررسیها نشان میدهد علیرغم جدیدبودن موضوع چالشهای زیادی نظیر یارامترهای مؤثر بر خواص ایتیکی نانوذرات و بررسی نانوذرات مختلف، بررسی عملکرد جذب نور، تبخیر در شدتهای پایین و نیز ارزیابی عملکرد پارامترهای مؤثر بر آن در ادبیات این موضوع مشهود است. یکی از نانوذراتی که دارای خاصیت اپتیکی و آنتیباکتریال بوده و قابلیتهای ویژهای در جذب نور و همچنین پایداری مناسبی در محلول پایه آب دارد، تیتانیوماکساید است. تاکنون اثر این نانوذره در تصفیه و زدودن رنگ از آب مورد بررسی قرار گرفته است^[16-18]. اما در میان منابع بررسی شده عملکرد این نانوذره در تولید بخار خورشیدی کمتر مشاهده میشود. از این رو در پژوهش حاضر به بررسی تجربی برداشت انرژی خورشید با استفاده از نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید پرداخته میشود. در این مطالعه برداشت انرژی بهصورت بهترین کیفیت انرژی یعنی تولید بخار خورشیدی، با استفاده از شبیهساز خورشیدی صورت میگیرد و پارامترهای مؤثر بر نرخ تبخیر نظیر شدت نور و غلظت بررسی خواهند شد. انتظار میرود که با این پژوهش بتوان عملکرد این نوع نانوسیال را در تبخیر خورشیدی ارزیابی نمود.

۲- بخش آزمایشگاهی

مجموعه آزمایشگاهی برای سیستم تولید بخار خورشیدی در شکل ۱ نشان داده شده است. اجزاء اصلی این مجموعه شامل یک شبیهساز خورشیدی (یک لامپ زنون ۱۶۰۰وات با دمای تابش ۲۰۰۰۶)، محفظه شیشهای حاوی نانوسیال، سنسورهای دما، ترازو دیجیتالی (کرنل با دقت ۲۰۰۰/۰۰، آلمان)، شدتسنج CMP (از شرکت Conen & Kipp & Zonen با دقت ۱۹۰۰/۰۰ ابا گستره طول موجی ۲۰۰ تا ۲۸۰۰m (و سیستم جمع آوری اطلاعات (دیتالاگر ساخت شرکت مهندسی یگانه تجهیز ویرا VIRA) است که سه سنسور بهمنظور گزارش دمای سیال در ارتفاعهای ۱۰، ۳۰ و ۵۰میلیمتر از کف بِشر ۵۰m قرار داده شده است.



شکل ۱) نمای کلی از مجموعه آزمایشگاهی بههمراه شبیهساز خورشیدی (A)، ترازو (B) و محفظه شیشهای بههمراه سنسورها (C)

یک سنسور نیز برای گزارش دمای محیط در بیرون بِشر تعبیه شده است. در هر تست مقدار ۶۰ml از سیال مورد نظر در بشر ریخته میشود و بعد از قرارگرفتن در محفظه ترازو و تحت تابش مستقیم، کاهش جرم، دمای چهار سنسور بههمراه زمان تست در دیتالاگر ثبت خواهند شد. بهمنظور تعیین شدت تابش از پیرانومتر استفاده شده و با تغییر ارتفاع و نیز به کمک لنز فرنل، سیستم برای شدتهای بالا کالیبره میشود.

۲-۱- آمادهسازی نانوسیال

بهمنظور آمادهسازی نانوسیالهای TiO₂ در چهار درصد جرمی ۲۰۰۱، ۷CN، ۲۰۰۴، ۲۰/۰ و ۲۰/۰ در گام نخست نانوذرات از شرکت VCN خریداری شدند. شکل ۲ تصویر TEM مربوط به این نانوذرات را نشان میدهد. این تصویر با دستگاه میکروسکوپ الکترونی (مدل LEO-1450VP) موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی گرفته شده است.



شکل ۲) تصویر TES از نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید (TiO₂)

سپس نانوذرات در سیال پایه آب دیونیزه توسط دستگاه آلتراسونیک به مدت ۳۰دقیقه پراکنده میشوند. شکل ۳ تصویر واقعی این نانوسیال را بههمراه مشخصات درصد جرمی نانوذرات نشان میدهد. پایداری نانوسیال توسط پارامتر پتانسیل زتا تعیین میشود. این پارامتر با استفاده از دستگاه ZetaCompact اندازهگیری و میانگین آن در سه مرحله و در ۶=pH مقدار ۳۶/۳۴mV- محاسبه شد.



شکل ۳) تصویری از نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید (TiO₂) با درصدهای جرمی متفاوت در مقایسه با آب

۶۰ محمدمصطفی غفوریان و همکاران

بهطور معمول، محدوده پتانسیل زتای بالای ۳۰mV بیانگر پایداری تقریباً مناسب نانوسیال است^[19, 20]. همچنین بازدیدهای چشمی بیانگر پایداری مناسب کلیه نمونهها در مدت زمان آزمایش (کمتر از ۱۰ساعت) بود.

۳- بحث و نتایج

به منظور مقایسه عملکرد نانوسیالها با آب در جذب نور مرئی از دستگاه Aligent-۸٤۵۳ استفاده می شود. این دستگاه جذب نور نمونه سیال را در محدوده طول موج ۳۰۰ تا ۵۰۸۰نانومتر که ۵۵% انرژی خورشید را به خود اختصاص داده، نشان می دهد. نتایج مربوط به این تست در نمودار ۱ برای نمونه های مختلف نانوسیال در مقایسه با آب خالص، در محدوده طول موج مرئی، ارائه شده است. همان طور با آب خالص، در محدوده طول موج مرئی، ارائه شده است. همان طور افزودن نانوذرات به آب، قابلیت جذب نور مرئی افزایش قابل توجهی می ابد. به طوری که میانگین جذب برای آب در گستره طول موج آزمایش ۵۱۰/۵% و برای سیال حاوی نانوذرات 2017 با غلظت این یعنی نانوذرات در محلول ساخته شده میزان جذب نور مرئی را به مرئی را دارد، ۳۳۶/۵۰% است. این یعنی نانوذرات در محلول ساخته شده میزان جذب نور مرئی را چندین برابر آب افزایش داده اند. در نتیجه پیش بینی می شود این نانوسیالها یک محیط جایگزین عالی برای جمع آوری انرژی خورشیدی و به ویژه تبدیلات نور به گرما باشند.



نمودار ۱) طیف جذبی آب و نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید (TiO₂)

برای بررسی عملکرد تبخیری، نانوسیال مورد نظر در داخل بشر تحت نور ساطعشده از یک شبیهساز خورشیدی با شدت 2-۳/۵kW.m آزمایش شد. نمودارهای ۲ و ۳ تغییرات دمایی آب و نانوسیال حاوی نانوذرات TiO2 و همچنین دمای محیط و شدت نور را در درصد جرمی ۴۰۰/۰ نشان میدهند. T دمای بالاترین سنسور در داخل سیال (در ارتفاع ۵۰۳۳)، T دمای پایینترین سنسور (در ارتفاع ۱۰۳۳۳) و مست دمای محیط (در بیرون بشر و در ارتفاع ۲۰۳۳) را در مدت زمان تست نشان میدهند. همان طور که در نمودارها مشاهده میشود، بالاترین سنسور (T) در نانوسیال بعد از ۳۰دقیقه ۲۱°C در آب ۲۰۵۲ افزایش دما را گزارش میکنند. این درحالی است که دمای محیط به طور یکسان ۲۰° افزایش مییابد. این نشاندهنده

نقش قابل توجه نانوذرات در بهبود عملکرد جذب نور و افزایش دمای سیال است. از طرفی با مقایسه تصویر حرارتی موجود در این دو نمودار میتوان دریافت که نانوذرات جذب نور را در سطوح بالایی محفظه محلیسازی کردهاند زیرا که در سطح بالایی و محدوده باند کمی، بیشترین دما مشاهده میشود.



نمودار ۲) افزایش دمای آب و نیز دمای محیط در شدت ۳/۵Suns



نمودار ۳) افزایش دمای نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO2) درصد جرمی ۰۰۰۴ بههمراه دمای محیط در شدت ۳/۵Suns

نمودار ۴ جرم تبخیرشده توسط نانوسیال را در مقایسه با آب در مدت زمان ۳۰دقیقه برای شدت ۳۸۵Suns نشان میدهد. جرم تبخیرشده به کمک ترازوی دقیق اندازهگیری شده است. همان طور که مشاهده میشود وجود نانوذرات در آب باعث افزایش تبخیر شده است؛ بهطوری که با افزودن نانوذرات تا درصد جرمی ۴۰۰/۰، نرخ تبخیر محلول تیتانیوماکساید (۱۰۲kg.m⁻².hr) تا ۱۸۵۴ برابر نرخ میتوان اینگونه توضیح داد که با جذب نور توسط نانوذره دمای آن میتوان اینگونه توضیح داد که با جذب نور توسط نانوذره دمای آن مجاور نانوذرات به بخار، کافی باشد. در نور ثابت، پوشش بخار در سطوح رشد کرده و با فرض حرکت این حباب به سطح مایع، بهدلیل اختلاف فشار جزیی آب در سطح و در هوای بالای آن، حباب آزاد



نمودار ۴) جرم تبخیرشده در شدت ۳/۵Suns برای آب و نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید (TiO₂) در درصد جرمی ۰/۰۰۴

شایان توجه است که حبابهای تشکیلشده در عمقهای پایین تر بهعلت تبادل حرارت با سیال اطراف خود، تقطیر خواهند شد و انرژی آنها صرف افزایش دمای بالک سیال می شود. قرارگرفتن طولانی تر در معرض نور خورشید، باعث افزایش کارآمد و پایدار تولید بخار بر پایه نانوذرات و کاهش مؤثر گرمایش بالک سیال شده و سرانجام منجر به تولید بخار و جوشش بالک سیال می شود. قابل توجه است که نانوذرات نه تنها در فاز بخار پراکنده نشده، بلکه در فرآیند تولید بخار از بین نمی رود.

بررسی غلظت در نرخ تبخیر

بهمنظور بررسی اثر غلظت نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید (TiO2) بر کارآیی تولید بخار خورشیدی، آزمایشهایی با پنج درصد جرمی ۰/۰۰۱، ۲۰۰/۰۰، ۵/۰۰ و ۰/۰۸ از نانوذرات، تحت توان متوسط خورشیدی ۳۵۰۰W.m⁻² (معادل ۳/۵Suns)، انجام شد. نتایج مربوط به تأثیر غلظت نانوذرات بر دما و جرم تبخیرشده در نمودارهای ۵ و ۶ ارائه شده است.

همانطور که مشاهده میشود افزایش غلظت نانوذرات از ۰٬۰۰۱ تا ۸۰/۰% در مدت ۳۰دقیقه، دمای بالاترین سنسور را از ۱۶/۹ به ۲۰/۷درجه سانتیگراد افزایش میدهد این درحالی است که جرم تبخیرشده از ۴۶/۰ به ۶۸/۰گرم افزایش خواهد یافت. دلیل این امر را میتوان به جذب بالای نور توسط نانوذرات ارتباط داد. زیرا نتایج این بخش با نتیجه نمودار ۱ که طیف جذبی را با درصدهای جرمی مختلف نشان میدهد و نیز با نتیجه دیگر محققان^[21,22] مطابقت دارد.



نمودار ۵) افزایش دمای بالاترین سنسور نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO2) در شدت ۳/۵Suns و درصدهای جرمی متفاوت در مقایسه با آب



نمودار ۶) جرم تبخیرشده نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید (TiO₂) در درصدهای جرمی متفاوت در مقایسه با آب و تحت شدت ۳/۵Suns

از طرفی دیگر بررسی نمونه اد ر شکل ۳ نشانگر تیرهتربودن نمونه ها با درصد وزنی بالا است که باعث شده بیشتر نور خورشید توسط قسمت بالایی نانوسیال جذب شود و میزان عبور نور در نمونه کاهش یابد. درحالی که برای رنگ شفاف تر نانوسیال، میزان عبور نور خورشید بیشتر است و قسمت عمده انرژی خورشیدی صرف گرم کردن توده سیال می شود. پایداری مطلوب تر نمونه می تواند غلظت ذرات را در سطح افزایش دهد (زیرا ته نشینی ذرات کمتر می شود). در نتیجه مطابق قانون بیر- لامبرت^[42, 23]، اکثر نور در لایه های بالایی نانوسیال پایدارتر، جذب خواهد شد که این امر برای تبخیر سطحی بسیار مناسب است.

قانون بیر- لامبرت بین عبور (جذب) نور و غلظت ذرات در کلوئید به صورت $A = \log_{10}(1/Tr) = abc$ ارتباط برقرار می کند، به طوری که A میزان جذب اندازه گیری شده، Tr ضریب عبور، a ضریب خاموشی مولی، d غلظت و c عمق نفوذ است. مشاهده می شود بین میزان نور عبوری و عمق نفوذ نور رابطه عکس وجود دارد. به منظور مشاهده متمایزتر اثر غلظت نانوذرات، نمودار جرم تبخیری و دمای نانوسیال در بالاترین سطح بر حسب غلظت نانوذرات در پایان مدت ۵۰۳دقیقه تست، در نمودار ۲ ارائه شده است.



نمودار ۲) جرم تبخیرشده و افزایش دمای بالاترین سنسور بعد از ۳۰دقیقه تست نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید (TiO₂) در درصدهای جرمی متفاوت تحت شدت ۳/oSuns

همانطور که مشاهده میشود رابطه مستقیمی بین افزایش دمای بالاترین سنسور و میزان جرم بخارشده محلول وجود دارد؛ اما با دقت بیشتر در این نمودار میتوان دریافت که افزایش غلظت از ۰/۰۰۱ تا

۶۲ محمدمصطفی غفوریان و همکاران ــ

۰۰/۰۰% باعث افزایش محسوس نرخ تبخیری و دمای بالاترین سنسور میشود، اما از درصد ۰/۰۰٤ تا ۰/۰۸ این تغییرات ناچیز است. پس میتوان درصد جرمی ۰/۰۰۶ را بهعنوان غلظت بهینه معرفی نمود.

بررسی اثر شدت نور در نرخ تبخیر

تا این مرحله کلیه تستها در شدت ۳/۵Suns انجام شد. در این بخش به بررسی اثر شدت نور بر نرخ تبخیر با سه شدت ۱/۵، ۱/۵ و ۳/۵Suns پرداخته میشود. تغییر شدت با تغییر فاصله منبع تابش از نمونهها فراهم میشود که در نهایت توسط پیرانومتر کالیبره میشود. نتایج افزایش دمای بالاترین سنسور و نیز جرم تبخیرشده برای بهترین رکورد جرم تبخیری (درصد جرمی ۲۰۰۴) بهترتیب در نمودارهای ۸ و ۹ ارائه شده است.



نمودار ۸) افزایش دمای بالاترین سنسور نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید (TiOz) در درصد جرمی ۲۰۰۴۰ و شدتهای متفاوت در مقایسه آب



نمودار ۹) جرم آب تبخیرشده نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO2) در درصد جرمی ۰۵/۰/۴ و شدتهای متفاوت در مقایسه با آب

همانطور که مشاهده میشود افزایش شدت نور از ۱/۵ به ۳/۵Suns دمای بالاترین سنسور را از ۲/۸درجه سانتی گراد بهطور قابل ملاحظهای تا ۲/۰۲درجه سانتی گراد در مدت ۳۰دقیقه افزایش میدهد. این درحالی است که جرم تبخیرشده در حدود ۲۱/۰گرم افزایش مییابد. در حقیقت روند افزایش جرم و دمای بالاترین سنسور با افزایش شدت پیشبینی میشد اما بهمنظور ارزیابی بهتر بین افزایش دما و جرم تبخیرشده نیاز است تا بازده تبخیری و

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

محسوس محاسبه شوند تا کارآیی نانوسیال در مقایسه با آب در شدتهای مختلف مشخص شود.

بازده تبخیری، محسوس و کل

بهمنظور ارزیابی بهتر برداشت انرژی خورشید، میتوان از تعاریف بازده تبخیری، گرمایی (محسوس) و بازده کل استفاده نمود. بازده تبخیری از تقسیم انرژی نهان تبخیر در فرآیند تولید بخار به کل انرژی تابش ورودی به سیال، تعریف میشود^[4, 9]:

$$\eta_{\text{integral}} = \frac{mh_{fg}}{I \times A} \tag{1}$$

که $\dot{m}(rac{kg}{hr})$ نمایانگر شار تبخیر آب، h_{fg} آنتالپی تغییر فاز $\dot{m}(rac{kg}{hr})$ در فشار ۱۳مسفر برای آب)، (I (W.m⁻²) ا شدت تابش و (Y۳۵۷kJ/kg) مسلح تابش است. لازم به ذکر است که در این مقاله، مانند مراجع مختلف[1, 4, 20] انرژی نهان تبخیر نانوسیال برابر سیال آب فرض شده است.

بازده گرمایی محسوس از تقسیم انرژی مربوط به افزایش دما بر کل انرژی تابش ورودی به سیال برای مدت زمان مشخص *t* بهصورت زیر تعریف میشود ^[4,9]:

$$\eta_{\text{galax}} = \frac{M \times C \times \Delta T/t}{I \times A} \tag{(Y)}$$

که M(kg) جرم نانوسیال، $C_{\rm P}\left(kJ.kg^{-1}.K^{-1}
ight)$ ظرفیت گرمایی ویژه سیال و ΔT مدت زمان افزایش دمای سیال به اندازه ΔT است. شایان توجه است برای اندازه گیری دمای متوسط سیال در ΔT ، از میانگین گیری دمای سه سنسور داخل سیال و برای C_{P} از ظرفیت گرمای ویژه آب در فشار ۱bar استفاده شده است.

بازده کل نیز مطابق رابطه ۳ از مجموع دو بازده تبخیری و گرمایی بهصورت زیر قابل محاسبه است.

$$\eta_{\rm J} = \eta_{\rm Sigma} + \eta_{\rm Sigma} \tag{(4)}$$

نتایج مربوط به بازده تبخیری، بازده گرمایی محسوس بههمراه بازده کل برای نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید با درصد جرمی بهینه ۴۰۰/۰۰ و برای آب، در شدتهای مختلف بهترتیب در نمودارهای ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

با مقایسه بازده در شدتهای متفاوت برای نانوسیال و آب مشاهده می شود که افزودن نانوذرات به طور میانگین، بازده تبخیری، بازده محسوس و در نتیجه بازده کل را نسبت به آب به طور چشمگیری افزایش می دهد. نکته قابل توجه در این دو نمودار این است که بهترین بازده تبخیری در شدت ۱/۵Suns اتفاق افتاده است و با افزایش شدت میزان بازده تبخیری در آب و نیز نانوسیال کاهش می ابد. دلیل این امر را می توان افزایش اتلافاتی (به علت عدم عایق در اطراف بشر) که باعث افزایش دمای بالک سیال شده دانست؛ زیرا که سطح مقطع تابش در همه آزمایش ها ثابت است. این موضوع باعث شده است نرخ تبخیر درصورت کسر رابطه ۱ نسبت به مقدار شدت خورشیدی در مخرج کسر، افزایش نیابد. این نتیجه در مراجع^[4, 1] نیز گزارش شده است، پیش بینی می شود با کاهش اتلافات می توان عملکرد نانوسیال را به طور چشم گیری بهبود داد.



نمودار ۱۰) بازده گرمایی، بازده تبخیری و بازده کل نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید (با درصد جرمی ۰/۰۰۰۶) در شدتهای متفاوت



نمودار ۱۱) بازده گرمایی، بازده تبخیری و بازده کل آب در شدتهای متفاوت

بهمنظور مقایسه نتایج پژوهش حاضر با دیگر مطالعات، بازده تبخیری مربوط به نانوسیال TiO₂ ونانوسیالهای گوناگون که دیگر محققین گزارش دادهاند در نمودار ۱۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده میشود در همه پژوهشها اثر شدت نور مطالعه نشده است و بازدههای بالا مربوط به نانوسیالهای ترکیبی نظیر Ag@TiO2، Ag@TiO2 یا نانوذره گرانبهای طلا است. این نشان میدهد تیتانیوماکساید توانایی خوبی در تولید بخار خورشیدی در مقایسه با دیگر نانوذرات دارد و اگر بهصورت ترکیبی با نانوذرات کربنی آمادهسازی شود نقش موثرتری در جذب نور خواهد داشت.

عملکرد تبخیری نانوذرات TiO₂ با آب دریا و تولید آب شیرین

بهمنظور مقایسه عملکرد تبخیری نانوذرات TiO2 در دو سیال پایه آب دریا و آب دیونیزه، تست تبخیری نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم بر پایه آب دیونیزه و آب دریا برای غلظتهای مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که تفاوت چندانی در نتایج نرخ تبخیری رخ نمیدهد، هر چند میزان نرخ تبخیر نانوسیال بر پایه آب دریا به مقدار ۵% کمتر است که میتوان علت آن را حضور یونهای متفاوت در آب دریا دانست؛ زیرا عملکرد تبخیری نانوذرات TiO2 را تحت تأثیر قرار میدهد.

پس از ارزیابی عملکرد تبخیری نانوسیال حاوی نانوذرات TiO₂ عملکرد تولید آب شیرین با استفاده از آب دریا و نانوذره نام برده مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور بخار حاصل از قراردادن نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (با درصد جرمی ۰/۰۰۴) با سیال پایه آب دریا تحت نور، تقطیر شد و تست آنالیز مواد تحت

ــ ارزیابی تجربی نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید (TiO2) در جذب نور خورشید و تولید بخار ۶۳

نام ICP برای دو حالت نانوسیال بر پایه آب دریا قبل و بعد از تست تقطیری انجام شد. نتایج آنالیز ICP برای محلول آب دریا قبل و بعد از تست در نمودار ۱۳ ارائه شده است.



نمودار ۱۲) مقایسه بازده تبخیری پژوهش حاضر در شدتهای متفاوت با نتایج گزارششده در شدتها و نانوسیالهای مختلف



نمودار ۱۳) غلظت یونهای موجود در محلول آب قبل و بعد از فرآیند تقطیری

همانطور که مشاهده میشود، قبل از فرآیند تبخیری، بیشترین یونهای موجود ۲۹٬۰ ۸۹٬۰ ۲۹٬۰ ۲۹٬۰ ۵ د Ti⁺³ و Ti⁺³ با مقدار ۷۲۸۷، ۸۵۳٬۰۳۵٬۰۳۵ و ۶/۷میلیگرم بر لیتر هستند که بعد از فرآیند تقطیری این مقادیر بهترتیب به ۰/۲۴٬۰ ۵۰٬۰۰ ۵۰٬۰۰ و ۰/۳۱ ۵۵۰٬۰۰میلیگرم بر لیتر کاهش مییابند. این نشان میدهد که نه تنها نانوذرات در فرآیند تبخیری از محلول پایه جدا نمیشوند، بلکه آب تولیدشده شرایط استاندارد جهانی آب آشامیدنی را بههمراه خواهد داشت.

۴- نتیجهگیری

در این پژوهش به بررسی عملکرد نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید در جذب نور خورشید پرداخته شد. پس از بررسی خواص اپتیکی این نوع نانوسیال، عملکرد آن بهصورت تجربی در تولید بخار مورد ارزیابی قرار گرفت. نانوسیال در غلظت جرمی ۲۰۰۱، ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۰۶ و ۲۰/۰۸ و در سه شدت (۲/۱، ۲/۵ و ۳/۵Suns) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این نوع نانوذرات در آب عملکرد مناسبی در جهت جذب مستقیم انرژی خورشیدی و تولید بخار دارند. همچنین بهترین غلظت آن در جذب و تولید بخار

۶۴ محمدمصطفی غفوریان و همکاران ــــ

خورشیدی ۲۰۰۴ است. نتایج نشان داد که بهترین بازده تبخیری برای نانوسیال در شدت ۱/۵Suns، ۲/۵۲% بهدست آمد. این درحالی است که در این شدت، بازده گرمایی و بازده کل بهترتیب ۴۰ و ۲۷۵/۲ محاسبه شد. از طرفی نتایج مربوط به تأثیر شدت نور نشان داد که افزایش شدت نور، بازده تبخیری را کاهش میدهد ولی باعث افزایش بازده گرمایی میشود؛ هر چند بهطور کلی میتوان بازده کل نانوسیال را در هر سه شدت یکسان فرض نمود. نتایج حاصل از آب تقطیرشده مربوط به محلول نانوسیال بر پایه آب دریا نیز نشان داد که با تقطیر بخار تولیدشده از نانوسیال و انرژی خورشید بهراحتی میتوان آب قابل شرب تولید نمود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان لازم میدانند از کارشناسان محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد و شرکت مهندسی یگانه تجهیز ویرا که در تمام مراحل حامی این پژوهش بودهاند، تقدیر و تشکر نمایند.

تاییدیه اخلاقی: نتایج ارائهشده، حاصل پژوهش نویسندگان بوده که تاکنون در نشریه یا مجموعه مقالات کنفرانس دیگری چاپ نشده است و در دست بررسی نیست.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمانهای دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: محمدمصطفی غفوریان (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۶۰%)؛ حمید نیازمند (نویسنده دوم)، روششناس (۲۰%)؛ امیراسماعیل معلمی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰%)؛ فاطمه توکلی دستجرد (نویسنده چهارم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۲۰%)

منابع مالی: این پژوهش با حمایتهای مالی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

پىنوشت

Α	جذب (%) و مساحت (m²)
а	ضريب خاموشى مولى
b	غلظت
С	ظرفیت گرمای ویژه (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
С	طول عبوری
Т	دما (°C)
t	زمان (s)
Tr	ضريب عبور
Ι	شدت نور (kW.m ⁻²)
ṁ	نمایانگر شار تبخیر آب (kg.hr ⁻¹)
h_{fg}	آنتالپی تغییر فاز (kJ.kg ⁻¹)
علائم يونانى	
η	بازده (%)
W	درصد جرمی (%)
زيرنويس	

1- Ghafurian MM, Niazmand H, Ebrahimnia Bajestan E, Elhami Nik H. Localized solar heating via graphene oxide nanofluid for direct steam generation. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2019;135(2):1443-1449.

2- Ghafurian MM, Niazmand H. New approach for estimating the cooling capacity of the absorption and compression chillers in a trigeneration system. International Journal of Refrigeration. 2018;86:89-106.

3- Ni G, Miljkovic N, Ghasemi H, Huang X, Boriskina SV, Lin CT, et al. Volumetric solar heating of nanofluids for direct vapor generation. Nano Energy. 2015;17:290-301.

4- Li H, He Y, Liu Z, Huang Y, Jiang B. Synchronous steam generation and heat collection in a broadband Ag@ TiO_2 core-shell nanoparticle-based receiver. Applied Thermal Engineering. 2017;121:617-627.

5- Neumann O, Urban AS, Day J, Lal S, Nordlander P, Halas NJ. Solar vapor generation enabled by nanoparticles. ACS Nano. 2012;7(1):42-49.

6- Neumann O, Feronti C, Neumann AD, Dong A, Schell K, Lu B, et al. Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2013;110(29):11677-11681.

7- Jin H, Lin G, Bai L, Amjad M, Bandarra Filho EP, Wen D. Photothermal conversion efficiency of nanofluids: An experimental and numerical study. Solar Energy. 2016;139:278-289.

8-Morciano M, Fasano M, Salomov U, Ventola L, Chiavazzo E, Asinari P. Efficient steam generation by inexpensive narrow gap evaporation device for solar applications. Scientific Reports. 2017;7(1):11970.

9- Zeiny A, Jin H, Lin G, Song P, Wen D. Solar evaporation via nanofluids: A comparative study. Renewable Energy. 2018;122:443-454.

10- Liu X, Huang J, Wang X, Cheng G, He Y. Investigation of graphene nanofluid for high efficient solar steam generation. Energy Procedia. 2017;142:350-355.

11- Ghafurian MM, Niazmand H, Ebrahimnia Bejestan E. Performance evaluation of multi-wall carbon nanotube in solar fresh water production. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2018. Articles in Press. [Persian] 12- Jin H, Lin G, Bai L, Zeiny A, Wen D. Steam generation in a nanoparticle-based solar receiver. Nano Energy. 2016;28:397-406.

13- Wang X, He Y, Cheng G, Shi L, Liu X, Zhu J. Direct vapor generation through localized solar heating via carbonnanotube nanofluid. Energy Conversion and Management. 2016;130:176-183.

14- Fu Y, Mei T, Wang G, Guo A, Dai G, Wang Sh, et al. Investigation on enhancing effects of Au nanoparticles on solar steam generation in graphene oxide nanofluids. Applied Thermal Engineering. 2017;114:961-968.

15- Shi L, He Y, Huang Y, Jiang B. Recyclable Fe₃O₄@CNT nanoparticles for high-efficiency solar vapor generation. Energy Conversion and Management. 2017;149:401-408. 16- Zhou L, Tan Y, Wang J, Xu W, Yuan Y, Cai W, et al. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination. Nature Photonics. 2016;10(6):393-398.

17- Lou J, Liu Y, Wang Z, Zhao D, Song Ch, Wu J, et al. Bioinspired multifunctional paper-based rGO composites for solar-driven clean water generation. ACS Applied Materials & Interfaces. 2016;8(23):14628-14636.

18- Liu Y, Lou J, Ni M, Song Ch, Wu J, Dasgupta NP, et al. Bioinspired bifunctional membrane for efficient clean

amb

محبط

. ارزیابی تجربی نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوماکساید (TiO2) در جذب نور خورشید و تولید بخار ۶۵

21- Zeng Y, Wang K, Yao J, Wang H. Hollow carbon beads for significant water evaporation enhancement. Chemical Engineering Science. 2014;116(1):704-709.

22- Amjad M, Raza G, Xin Y, Pervaiz Sh, Xu J, Du X, et al. Volumetric solar heating and steam generation via gold nanofluids. Applied Energy. 2017;206:393-400.

23- Swinehart DF. The beer-lambert law. Journal of Chemical Education. 1962;39(7):333-345.

24- Ghafurian MM, Niazmand H, Ebrahiminia Bajestan E. Improving steam generation and distilled water production by volumetric solar heating. Applied Thermal Engineering. 2019;158:113808. water generation. ACS Applied Materials & Interfaces. 2016;8(1):772-779.

19- Ghafurian MM, Akbari Z, Niazmand H, Mehrkhah R, Wongwises S, Mahian O. Effect of sonication time on the evaporation rate of seawater containing a nanocomposite. Ultrasonics Sonochemistry. 20019. In Press.

20- Ghafurian MM, Niazmand H, , Akbari Z, Bakhsh Zahmatkesh B. Performance evaluation of Ferric oxide (Fe_3O_4) and Graphene nanoplatelet (GNP) nanoparticles in solar steam generation. Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2019;9(2):181-196. [Persian]