

نانوسیالات خنک‌کننده نیروگاهی

شناخت، خواص، بکارگیری و آزمون

تألیف:

دکتر اشکان ذوالریاستین

(عضو هیات علمی پژوهشگاه نیرو)

مهندس سروش جوادی پور

(کارشناس ارشد مهندسی مواد-نانومواد)

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

ذوالریاستین، اشکان، ۱۳۶۵ -

ناتوسیالات خنک کننده نیروگاهی: شناخت، خواص، بکارگیری و آزمون/ تالیف اشکان ذوالریاستین، سروش جوادی پور؛ ویراستار ادبی نازنین محمدی نام. تهران: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

۳۹۵ ص: مصور (رنگی)، جدول، نمودار

ISBN: ۹۷۸-۶۲۲-۹۸۰۰-۱-۸-۸ : ۷۵۰۰۰۰ ریال

فهرست نویسی بر اساس اطلاعات فیا

کتابنامه: ص. ۲۷۹-۲۹۵.

۱. نیروگاه های برق - سردسازی. ۲. ناتوسیالات. ۳. سردسازی و دستگاه های سردکننده. ۴.

برج های خنک کننده. ۵. نئوذرات - کاربردهای صنعتی. ۶. -- Electric power-plants

Cooling ۷. Nanofluids ۸. Refrigeration and refrigerating machinery

۹. Cooling towers ۱۰. Nanoparticles -- Industrial applications

الف. سروش، جوادی پور، ۱۳۶۸ -

رده بندی دیویی: ۶۲۱/۳۱۲۱

شماره کتابشناسی ملی: ۸۵۳۷۸۱۴

www.ketab.ir

انتشارات پژوهشگاه نیرو

چاپ اول: پاییز ۱۴۰۰

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دامن، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

پیشگفتار

یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنایع نیروگاهی و به‌طور کلی هر سیستمی که به نوعی با انتقال گرما ارتباط دارد، استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده‌ی پیشرفته و بهینه است که در افزایش بهره‌وری تولید برق و ارتقای بازده نیروگاه‌ها نقش اساسی دارد. بهبود راندمان خنک‌کاری موجب کاهش چشمگیر آب مصرفی در نیروگاه‌ها، کاهش اندازه‌ی سیستم‌های خنک‌کننده و همچنین کم شدن بار پمپ‌ها و کاهش مصرف داخلی نیروگاه از طریق کاهش دبی موردنیاز جریان سیال خنک‌کننده می‌شود.

سرمایش و گرمایش سیالات انتقال‌دهنده حرارت در بسیاری از فرایندهای صنعتی شامل منابع حرارتی، فرایندهای تولیدی، حمل و نقل و الکترونیک نقش مهمی دارد و روش‌های زیادی برای افزایش نرخ انتقال حرارت در این فرایندها گزارش شده‌اند. اساس بیشتر این روش‌ها بر مبنای تغییرات در ساختار تجهیزات مانند افزایش سطوح حرارتی، مانند اندازه‌ی پره‌های مبدل، لرزش سطوح حرارتی، تزریق یا مکش سیال و اعمال جریان الکتریکی یا مغناطیسی متمرکز هستند. در این میان یک راهکار مهم بدون تغییر در طراحی و ساختار سازه‌های سیستم‌های خنک‌کننده، بهبود ضریب انتقال حرارت سیالات خنک‌کننده است. محیط‌های انتقال حرارت معمولاً از سیالاتی مانند آب، اتیلن گلیکول یا روغن تشکیل شده‌اند. این سیالات ضریب انتقال حرارت بسیار پایینی در مقایسه با فلزات و حتی اکسیدهای فلزی دارند. ایده‌ی استفاده از سیالات معمولی حاوی میکروذرات یک راهکار اولیه برای افزایش ضریب انتقال حرارت سیال است، اما این راهکار دارای مشکلاتی همچون کلوخه شدن^۱ ذرات، ته‌نشین شدن^۲ ذرات، سائیدگی^۳ لوله‌ها، رسوب^۴ و افزایش افت فشار^۵ در مجرای سیال است.

نانوسیال، یک سوسپانسیون حاوی نانوذرات معلق از مواد فلزی یا غیر فلزی است که می‌تواند ضریب هدایت حرارتی پایین سیالات متداول را بهبود بخشد. نانوذرات به دلیل اندازه‌ی کوچک ذرات و کسر حجمی پایین مورد استفاده در حل مشکلاتی مانند کلوخه شدن است و افت فشار سیال را تا حد زیادی حل می‌کند. افزون‌براین، اندازه‌ی نانوذرات باعث غلبه‌ی حرکت براونی به نیروی گرانشی می‌شود که دلیل پایداری ذرات بوده و مسئله‌ی ته‌نشینی را کاهش می‌دهد و هزینه‌های لازم برای نگهداری و انتقال سیالات را کم می‌کند. مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در پایداری نانوسیالات روش سنتز، غلظت نانوذرات،

1- agglomeration.

2- sedimentation.

3- erosion.

4- fouling.

5- pressure drop.

میزان و نوع پخش کننده‌ها و مواد فعال سطحی (surfactant)، ویسکوزیته سیال، مقدار pH، نوع نانوذرات، قطر نانوذرات و مدت زمان اولتراسونیک است.

نانوسیالات می‌توانند به عنوان مکمل و به صورت افزودنی با نسبت‌های مشخص برای سیالات خنک‌کننده‌ی متداول مانند آب و اتیلن گلیکول در سیستم‌های مختلف خنک‌کننده‌ی صنعتی و نیروگاه‌های حرارتی به منظور بهبود انتقال حرارت و راندمان خنک‌کاری به کار گرفته شوند. برای استفاده‌ی مطلوب از نانوسیال مناسب و بهره‌گیری از مزایای آن، اطلاعات درباره‌ی مشخصات فنی نانوسیال الزامی است. نانوسیالات باید پیش از مصرف از جنبه‌های مختلفی مانند اندازه‌ی ذرات، میزان پایداری، بهبود انتقال حرارت، خوردگی، رسوب‌گذاری، تطابق با ترکیب و شرایط محیطی سیال پایه نیروگاهی و افزودنی‌های سیالات نیروگاهی و همچنین تطابق با مشخصات فنی سیستم‌های خنک‌کننده‌ی نیروگاهی موردبررسی و کنترل کیفیت قرار گیرند.

در این کتاب در فصل اول به معرفی و شناخت نانوسیالات خنک‌کننده و دسته‌بندی انواع نانوسیالات خنک‌کننده با قابلیت استفاده در سیستم‌های خنک‌کننده‌ی نیروگاهی پرداخته شده است. در فصول بعدی (دوم تا پنجم) بررسی اثرات نانوذرات افزوده شده بر رفتار نانوسیالات و همچنین شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر خواص فیزیکی و شیمیایی نانوسیالات نظیر ویسکوزیته و انتقال حرارت انجام شده است و در ادامه روش‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت و همچنین نانو ذرات هیبریدی معرفی شده‌اند.

در فصل ششم به معرفی انواع مصارف و ویژگی‌های آب در حوزه نیروگاهی پرداخته شد. در فصل هفتم و هشتم انواع برج‌های خنک‌کننده، کندانسورها و کیفیت آب مورد استفاده در آنها موردبررسی قرار گرفت. در فصل نهم به معرفی سیالات خنک‌کننده توربین گازی و بررسی شرایط و ویژگی‌های مورد انتظار آن پرداخته شد.

فصل دهم به عنوان جمع‌بندی به دستورالعمل پیشنهادی استفاده از نانوسیالات در نیروگاه‌ها مشتمل بر آزمون‌ها و معیارهای پذیرش مربوطه برای سنجش پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد نانوسیال اختصاص دارد. این دستورالعمل با هدف ایجاد وحدت رویه در تعیین آزمون‌ها و ویژگی‌های کیفی نانوسیال تنظیم شده است تا از به کارگیری نانوسیالات نامرغوب و غیراستاندارد جلوگیری شده و از آسیب رسیدن به سیستم‌های خنک‌کننده‌ی نیروگاهی پیشگیری شود.

امید است که این کتاب بتواند به عنوان مرجعی مناسب برای مهندسين شاغل در صنعت نیروگاهی و فناوران و پژوهشگران این حوزه مورد استفاده قرار گیرد.

عنوان	فهرست مطالب	صفحه
فصل اول: شناخت نانوسیالات		۲۱
۱-۱- مقدمه		۲۲
۱-۲- مروری بر روش‌های سنتز نانوسیالات		۲۳
۱-۲-۱- روش سنتز تک مرحله‌ای		۲۳
۱-۲-۲- روش سنتز دو مرحله‌ای		۲۵
۱-۳- روش‌های متداول دیگر در سنتز نانوسیالات		۲۷
۱-۴- فاکتورهای مؤثر در پایداری نانوسیالات و روش‌ها و ابزارهای متداول در بررسی آن		۲۸
۱-۴-۱- فاکتورهای مؤثر در پایداری نانوسیالات		۲۹
۱-۵- آزمون‌های مربوط به نانوسیالات		۳۳
۱-۵-۱- تست پتانسیل زتا		۳۴
۱-۵-۲- انواع روش‌های ارزیابی پایداری		۳۵
۱-۶- کاربردهای گسترده نانوسیالات		۳۶
۱-۶-۱- کاربردهای نانوسیالات در علوم نوین		۳۷
۱-۶-۲- کاربردهای نانوسیالات در مهندسی انتقال حرارت		۳۸
۱-۶-۳- کاربردهای نانوسیالات در سیستم‌های خنک کننده نیروگاهی و صنعتی		۴۴
۱-۷- انواع نانوسیالات سنتز شده در پژوهش‌ها		۴۴
فصل دوم: بررسی اثرات نانوذرات افزوده شده به سیالات نیروگاهی		۴۶
۱-۲- تأثیر نانوذرات بر میزان دمای سیال تبخیر شده بر روی سطح داخلی لوله‌ها		۴۷
۲-۲- تأثیر نانوذرات بر افت فشار در طول لوله		۵۰
۳-۲- تأثیر نانوذرات بر آنتروپی		۵۱
۴-۲- اثرات غلظت نانوذرات بر روی بیشترین مقدار انتقال حرارت درون لوله‌ها		۵۲
۵-۲- بررسی تأثیر افزودن نانوذرات بر انتقال گرمای جوش سیالات		۵۳
۶-۲- بررسی گرمای ویژه با افزودن نانوذرات به سیال		۵۴
۷-۲- بررسی تغییرات افت فشار و توان پمپ با افزودن نانوذرات به سیال		۵۵
۸-۲- بررسی هدایت حرارتی با افزودن نانوذرات به سیال		۵۶
۹-۲- بررسی چگالی با افزودن نانوذرات به سیال		۵۷
۱۰-۲- بررسی دبی سیال خنک کننده با افزودن نانوذره به سیال		۵۷
۱۱-۲- اثرات نانوسیالات بر روی توان پمپ		۵۸
۱۲-۲- بررسی جریان حجمی سیال خنک کننده		۵۹
۱۳-۲- بررسی سرعت سیال خنک کننده با افزودن نانوذره به سیال		۵۹
۱۴-۲- بررسی عدد رینولدز با افزودن نانوذره به سیال		۶۰
۱۵-۲- بررسی عدد نلسلت با افزودن نانوذره به سیال		۶۰
۱۶-۲- بررسی عدد پراوتل با افزودن نانوذره به سیال		۶۱
فصل سوم: بررسی ویسکوزیته با افزودن نانوذرات به سیال		۶۲
۱-۳- مقدمه		۶۳

۶۴	۲-۳- اثرات اصلاح سطح نانوذرات بر روی ویسکوزیته
۶۴	۳-۳- اثرات غلظت نانوذرات بر روی ویسکوزیته
۶۴	۴-۳- اثرات شکل نانوذرات بر روی ویسکوزیته
۶۵	۵-۳- اثر دما بر روی ویسکوزیته
۶۶	۶-۳- اثرات نانوذرات کامپوزیتی بر روی ویسکوزیته
۶۷	۷-۳- اثرات pH کامپوزیتی بر روی ویسکوزیته
۶۷	۸-۳- اثرات روش سنتز بر روی ویسکوزیته
۶۷	۹-۳- اندازه‌گیری ویسکوزیته
۶۸	۹-۳-۱- ویسکومترهای دورانی
۶۸	۹-۳-۲- ویسکومترهای U شکل
۶۹	۹-۳-۳- ویسکومترهای سقوطی
۷۰	۹-۳-۴- ویسکومترهای لرزشی
۷۱	۹-۳-۵- ویسکومترهای استابینگ
۷۱	۹-۳-۶- فنجان ویسکوزیته
۷۲	۹-۳-۷- ویسکومتر بروکفیلد
۷۴	۹-۳-۱۰- عوامل مؤثر بر نتایج ویسکومتر بروکفیلد
۷۴	۱۰-۳- بررسی رنومترها
۷۴	۱۱-۳- رنومتر برشی
۷۵	۱۲-۳- ویسکومترهای لوله‌مومینه یا رنومتر گترزون
۷۵	۱۳-۳- رنومتر مومینه SMV-20
۷۶	۱۴-۳- ویسکومتر مخروط و صفحه
۷۷	۱۵-۳- رنومترهای کششی
۷۸	فصل چهارم: بررسی ویژگی‌های انتقال حرارت
۷۹	۱-۴- مقدمه
۷۹	۲-۴- انتقال حرارت در جامدات
۸۰	۳-۴- انتقال حرارت در مایعات
۸۰	۴-۴- انتقال حرارت در سطح مشترک جامد - مایع
۸۰	۵-۴- مکانیسم‌های انتقال حرارت در نانوسیالات
۸۰	۵-۴-۱- حرکت براونی در نانوذرات
۸۲	۵-۴-۲- خوشه‌بندی و آگلومره شدن نانوذرات
۸۴	۵-۴-۳- ایجاد یک لایه نازک دور نانوذرات و ایجاد سطح مشترک میان نانوذره و سیال پایه
۸۴	۵-۴-۴- انتقال پالستیک
۸۵	۵-۴-۵- اثر ترموفورتیک
۸۵	۵-۴-۶- تابش میان سطوح نزدیک
۸۶	۶-۴- رسانایی حرارتی
۹۱	۷-۴- اثرات pH محیط بر روی رسانایی حرارتی
۹۳	۸-۴- اثرات پایدارکننده‌ها بر روی رسانایی حرارتی

نانوسیالات، سوسپانسیون‌هایی متشکل از نانوذرات معلق و سیال پایه هستند که اندازه‌ی این ذرات، در حدود بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد [۱]. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که نانوسیالات دارای خواص ترموفیزیکی منحصر به فرد هستند و خواصی همچون رسانایی حرارتی،^۱ ویسکوزیته (گرانروی)^۲ و ضریب رسانش حرارت^۳ سیال پایه را توسعه می‌بخشند [۲-۳]. افزودن نانوذرات به سیالات باعث افزایش رسانایی حرارتی آنها می‌شود [۴-۵] که ارتباط مستقیمی با نسبت حجمی نانوذرات دارد؛ در حقیقت، با افزایش نسبت سطح به حجم نانوذرات، به‌طور محسوسی رسانایی حرارتی نیز بالا می‌رود [۶]. به‌طور کلی، نانوسیالات گروهی از سیالات هستند که در مقایسه با سیالات دیگر، توانایی بیشتری در انتقال حرارت دارند. سیستم‌های خنک‌کننده، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های کارخانه‌ها و صنایعی مانند میکروالکترونیک است که به نوعی با پدیده‌ی انتقال حرارت مواجه هستند. با پیشرفت فناوری در صنایع و استفاده از موتورهای با توان و بار گرمایی بالا، حضور نانوسیالات در سیستم به‌عنوان سیالات خنک‌کننده اهمیت به‌سزایی پیدا می‌کند. بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال گرما، در اکثر مواقع به‌وسیله‌ی افزایش ابعاد آنها صورت می‌پذیرد که همواره باعث افزایش حجم و اندازه‌ی این دستگاه‌ها می‌شود. بنابراین برای غلبه بر این مشکل، به خنک‌کننده‌های جدید و مؤثر نیاز است و نانوسیالات به‌عنوان راهکاری جدید در این زمینه مطرح شده‌اند.

نانوسیالات به علت افزایش قابل توجه خواص گرمایی، توجه بسیاری از دانشمندان را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌اند. به‌عنوان مثال، اضافه کردن مقدار کمی از نانولوله‌های کربنی در روغن، بهبود ۱۵۰ درصدی در هدایت گرمایی سیالات را فراهم می‌سازد. به‌طور کلی، از نانوسیالات می‌توان به‌منظور توسعه‌ی سیستم‌های کنترل حرارت در بسیاری کاربردها از جمله وسایل نقلیه سنگین استفاده نمود. تحقیقات پیرامون نانوسیالات می‌تواند به پیشرفت غیر منتظره‌ای در زمینه‌ی سیستم‌های ترکیبی مایع/جامد، به‌عنوان خنک‌کننده‌های نیروگاهی منجر شود. از عمده‌ترین تأثیرات نانوسیالات می‌توان به افزایش کارایی، کوچک‌تر و سبک‌تر شدن سیستم‌های حرارتی، کمتر شدن هزینه‌های عملیاتی و پاک‌سازی محیط زیست اشاره کرد. به‌طور کلی، هنگامی که نانوذرات در سیال پراکنده می‌شود و به صورت نانوسیال درمی‌آید، سیالی با ویژگی‌های منحصر به فرد خواهیم داشت. با کاهش اندازه‌ی ذرات در حد نانو و افزایش نسبت سطح به حجم آنها، می‌توان میزان رسانایی حرارتی را افزایش داد. ذراتی با اندازه‌ی ۲۰ نانومتر و دارا بودن ۲۰ درصد حجمی اتمی بر روی سطح، می‌تواند سریع و به صورت لحظه‌ای، توانایی خود را جهت برهم‌کنش گرمایی افزایش دهد. مشخصه‌ی منحصر به فرد دیگری که قابل توجه است، تحرک‌پذیری نانوسیالات است که به

1- Thermal conductivity.

2- Viscosity.

3- Convective heat transfer coefficients.

اندازه‌ی ذرات ارتباط دارد و باعث ایجاد جریان میکروهمرفتی در سیالات می‌شود و در نتیجه رسانش حرارتی را بالا می‌برد. این پدیده، نشان از آن دارد که رسانایی حرارتی نانوسیالات، به شکل مؤثری با افزایش دما، بالا می‌رود [۷]. از طرفی، به دلیل آن که ذرات کوچک هستند و حرکت براوونی بر نیروی گرانش غلبه می‌یابد، رسوب‌گذاری کاهش پیدا می‌کند که منجر به فائق آمدن بر یکی از مشکلات یعنی پایداری در سیال می‌شود [۸]. نانوسیالات، نه تنها بهترین گزینه به منظور افزایش رسانایی حرارتی هستند، بلکه برای کاهش رسوب‌گذاری در میکروکانال‌ها جهت افزایش بازدهی در سیستم، بهترین گزینه به شمار می‌آیند. وارد کردن نانوسیالات خنک‌کننده به درون میکروکانال‌ها، رسانایی حرارتی سیال را بالا می‌برد و محیط مناسبی جهت انتقال حرارت فراهم می‌سازد. میکرو یا مژودرات، نمی‌توانند همانند نانوذرات در کانال‌ها عمل کرده و به دلیل ویسکوزیته‌ی بالا، منجر به انسداد میکروکانال‌ها خواهند شد. نانوذراتی که تنها تعداد اتم‌های سطحی آنها در حدود صدها یا هزاران اتم باشند، از اهمیت بیشتری برخوردارند و می‌توان آنها را در میکروکانال‌ها، تزریق کرد [۸].

همچنین، نانوذرات در ابعاد بسیار کوچک و با اندازه‌ی حرکت نامحسوس، از رسوب‌گذاری بر روی دیواره‌ی داخلی کانال‌ها جلوگیری به عمل می‌آورد و رسانایی حرارتی در کانال‌ها و پمپ‌ها را افزایش می‌دهد. کاهش در میزان پمپاژ سیال در سیستم، از دیگر ویژگی‌های نانوذرات است. علاوه بر افزایش رسانایی حرارتی سیال تعریف‌شده، و علاوه بر دو فاکتور تعریف‌شده در بالا، توان پمپ نیز باید به‌طور معمول با افزایش آنها، تغییر کند و بالا رود [۹]. بنابراین، می‌توان نشان داد با افزایش توان پمپاژ در سیستم، میزان ویسکوزیته نیز به میزان چشمگیری، افزایش می‌یابد و در نهایت، می‌توان از مصرف بی‌رویه در افزایش توان پمپ، با افزایش رسانایی حرارتی سیال کاست و ذراتی با ابعاد کوچک به سیستم تزریق کرد [۱۰].

۲-۱- مروری بر روش‌های سنتز نانوسیالات

۲-۱-۱- روش سنتز تک‌مرحله‌ای

روش‌های بسیار محدودی برای سنتز نانوسیالات به روش تک‌مرحله‌ای وجود دارد و از این بین تنها می‌توان به روش‌های: (۱) رسوب‌گذاری گرمایی گرماپی نانوذرات آلی در ماده‌ی متشکله‌ی پایدارکننده؛ (۲) اکسایش شیمیایی و (۳) سنتز پلی‌ال^۱ اشاره کرد [۸۰].

۱- Polyol method.