



مطالعه تجربی انتقال حرارت کل در رادیاتور خودرو با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیم

احمد یعقوبی^۱، هامون پورمیرزاآقا^۲، جواد رضاپور^۳، محسن حقدادی^۴

محل کار: مرکز آموزش فنی و حرفه ای شهید مطهری رشت - آدرس: رشت، کیلومتر ۷ جاده تهران، جنب انبار برق

آدرس پست الکترونیک: yaghobi6141@yahoo.com

چکیده

صنعت خودروسازی دستخوش بهبود مستمر در تمامی زمینه‌های اصلی خود است؛ افزایش انتقال حرارت رادیاتور خودرو یکی از جنبه‌های مهم این صنعت می‌باشد. در سال‌های اخیر تأکید بیشتری بر روی انتقال حرارت نانوسیال در انواع مختلف مبدل‌های حرارتی مانند مبدل‌های پوسته-لوله، دو لوله‌ای و صفحه‌ای صورت گرفته است اما مطالعات انگشت‌شماری روی رادیاتور خودرو انجام شده است. در این پژوهش، سیالات خنک‌کننده‌ی آب خالص و نانو سیال اکسید آلومینیم در سه درصد وزنی (۰/۱، ۰/۳ و ۱ درصد) به صورت آزمایشگاهی در رادیاتور خودرو ۲۰۶ برای بررسی انتقال حرارت استفاده و با هم مقایسه شده‌اند. به منظور انجام این کار ابتدا موتور TU3 خودرو ۲۰۶ سرویس و راه‌اندازی گردید. سپس، تجهیزات اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها نظیر ترمومتر و دی‌سنج در نقاط لازم نصب شد. تست‌ها برای دو حالت دور تند و متوسط فن و در چهار دور موتور مختلف صورت پذیرفته است. در دور تند فن، بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت نسبت به آب برای نانوسیال اکسید آلومینیم در درصد وزنی ۱ درصد و دور موتور ۱۱۵۲ rpm حاصل شد که ۲۹/۵۲ درصد می‌باشد. در دور متوسط فن نیز بیشترین افزایش انتقال حرارت برای نانوسیال اکسید آلومینیم نسبت به آب در دور موتور ۱۱۵۲ rpm و درصد وزنی ۱ درصد حاصل شد که ۲۷/۸۰ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، رادیاتور، نانوسیال، نانوپودر، TU3.

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد لنگرود، دانشگاه آزاد اسلامی، لنگرود، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.
- ۴- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.



Experimental Investigation of Overall Heat Transfer in the Application of Nanofluids in the car Radiator

Ahmad Yaghoubi¹, Hamoon Pourmirzaagha², Javad Rezapour³, Mohsen Haghdadi⁴

Work: Vocational Training Centre Motahari Rasht - Address: Rasht, 7 km Tehran Road, next to the power storage

Email Address : yaghobi6141@yahoo.com

Abstract:

Car manufacturing industry is improving all of the own basic fields continuously. One of the aspects which are important is about increasing heat transfer in the car radiator. Heat transfer by using nanofluids in the heat exchangers such as shell-tube, double-tube and plate heat exchangers has emphasized recently, but a few survey about the car radiator has done. In this paper, cooling fluids include pure water and Al₂O₃ nanofluid with mass fraction 0.1, 0.3 and 1, through experimental investigation for 206 automobile compared. For this purpose first of all TU3 engine of 206 automobile serviced and then started up. After that, requirements of measurement and data capturing such as thermo-meter and flow-meter had installed. Test for two conditions with fast and medium rotational speeds of fan in four different rotational speeds of engine has done. In the fast rotational speed of fan, 1152 rpm rotational speed condition, maximum heat transfer of water by 1% mass fraction of Al₂O₃, 29.5 % obtained. In the medium rotational speed of the fan, the maximum heat transfer for Al₂O₃ nanofluid occurred in the 1152 rpm with 1% mass fraction which obtained 27.8%.

Key words: Heat transfer, Radiator, Nanofluid, Nano powder, TU3

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Langeroud Unit, Islamic Azad University, Langeroud, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ramsar Unit, Islamic Azad University, Ramsar, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Lahijan Unit, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

4- MSc, Department of Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran.



۱- مقدمه

مبدل‌های حرارتی وسایلی هستند که جریانی از انرژی حرارتی را بین دو یا چند سیال در دماهای مختلف برقرار می‌کنند و وظیفه تبادل حرارت را به عهده‌دارند. این تجهیزات در صنایع تولید برق، صنایع فرایندی، صنایع شیمیایی و غذایی، تجهیزات الکترونیکی، صنایع تولیدی، تهویه مطبوع، سرمایه‌ش و کاربردهای فضایی استفاده می‌شوند [۱]. در صنعت حمل‌ونقل، خنک‌کاری یک موضوع حیاتی است، زیرا که روند پیش‌رو در افزایش قدرت موتورها و یا خودروهای هیبرید، ناگزیر از به‌کارگیری رادیاتورهای بزرگ‌تر و در نتیجه سطح پیشانی بیشتر است که باعث افزایش نیروی پسا و مصرف سوخت بالاتر می‌گردد.

با پیشرفت فناوری، تحقیقات در زمینه ساخت تجهیزات صنعتی با ابعاد کوچک‌تر به سرعت در حال گسترش است. در روند پیشرفت فناوری ساخت تجهیزات با ابعاد کوچک‌تر، دفع حرارت از سطوح بحرانی‌تر می‌شود. با این‌گونه پیشرفت‌های علم و فناوری در ساخت تجهیزات در ابعاد میکرو و نانو از ۵ دهه پیش، زمینه برای ایجاد تغییر اساسی در نحوه خنک‌کاری وسایل الکترونیکی نیز ایجاد شد [۲].

اولین مانع جدی در فشرده‌سازی و کارآمد کردن دستگاه‌های انتقال حرارت، خواص ضعیف انتقال حرارت سیالات متداولی همچون آب و اتیلن گلیکول می‌باشد. در فرآیندهای انتقال حرارت هدایتی و جابجایی یکی از مشخصه‌های مؤثر سیال، ضریب هدایت حرارتی آن است. بالا بودن این مشخصه بیانگر بالا بودن نرخ انتقال حرارت توسط هریک از دو مکانیسم یادشده است. هدایت حرارتی در ذرات جامد حدوداً صدها برابر بیشتر از سیالات رایج در انتقال حرارت می‌باشد. بنابراین ساخت سوسپانسیونی از ذرات ریز جامد در سیالات خالص یک راهکار جدید برای افزایش خواص انتقال حرارت سیالات حامل انرژی می‌باشد [۲،۳].

افزایش راندمان و بهبود مصرف انرژی در صنایع همواره مورد توجه محققان بوده است. بهبود انتقال حرارت در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی نیز از این قاعده مستثنی نیست، از این رو تحقیقات گسترده‌ای برای استفاده از سیالات جایگزین به جای سیالات متداول نظیر آب و اتیلن گلیکول که بتواند خواص حرارتی مناسب‌تری را بروز دهد انجام شده است. از سوی دیگر خواص چند برابری هدایت حرارتی فلزاتی نظیر مس و آلومینیوم در مقایسه با مایعات متداول باعث شده است تا ایده‌ی پخش کردن ذرات فلزی در مایعات توسط ماکسول مطرح شود، [۴]. اما می‌توان گفت چوبی و ایستمن [۵] و ماسودا و همکاران [۶] اولین محققانی بودند که نانوسیالات در معنای امروزی را مورد استفاده قرار دادند. نانوسیالات در معنای امروزی را می‌توان سیالاتی دانست که ذرات بسیار ریز در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر در داخل سیال پایه مانند آب و یا اتیلن گلیکول پایدار شده‌اند [۷]. نانوسیالات در سال‌های گذشته در بسیاری از عرصه‌های مهندسی مانند سیستم‌های خورشیدی، خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، کاربردهای پزشکی، پیل‌های سوختی، راکتورهای هسته‌ای و افزایش راندمان سیستم‌های حرارتی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

داس و همکاران نتیجه گرفتند که رسانایی حرارتی مستقیماً با دما متناسب است و مقادیر از مدل مؤثر رسانایی حرارتی بدست نیامده‌اند. آنها پیشنهاد دادند که تعداد ذرات بیشتر، به علت افزایش مساحت برای انتقال حرارت، منجر به رسانایی حرارتی بالاتری می‌شود [۸].

پیغمبرزاده و همکاران، رادیاتور ماشین را با نانوسیال اکسید آلومینیم با سیال پایه‌ی آب آزمایش کردند. غلظت حجمی در بازه‌ی ۰/۱-۱٪ متغیر بود. بیشترین افزایش انتقال حرارت بالغ بر ۴/۵٪ با غلظت حجمی ۱٪ گزارش شد [۹].



الیاس و همکاران، دستاوردهایی را در مورد رسانایی حرارتی، ویسکوزیته، گرمای ویژه و چگالی نانوسیال‌های اکسید آلومینیم در آب و اتیلن گلیکول که به عنوان خنک کننده در رادیاتور خودرو استفاده می‌شود، گزارش دادند. غلظت حجمی و دمای خنک کاری بالای ۱٪ و ۵۰ درجه سانتیگراد، به ترتیب، نگه داشته شد. ویسکوزیته، رسانایی حرارتی و چگالی نانوسیال مشاهده شد که افزایش می‌یابد در حالیکه گرمای ویژه نانوسیال با افزایش غلظت حجمی مشاهده شد که کاهش می‌یابد [۱۰].

پیغمبرزاده و همکاران، به صورت تجربی اثر نانوذرات اکسید آلومینیم را در آب و اتیلن گلیکول با کسر حجمی ۱٪-۰/۱ نانوسیال آماده شده، بررسی کردند. نرخ جریان خنک کاری از ۲ تا ۶ لیتر بر دقیقه متغیر بود. برای نانوسیال با سیال پایه‌ی آب و نانوسیال با سیال پایه‌ی اتیلن گلیکول، دماهای ورودی در بازه‌ی ۵۰-۳۵ درجه و ۶۰-۴۵ درجه به ترتیب متغیر بود. عدد رینولدز در بازه‌ی ۱۲۰۰-۲۵۰۰ و ۲۳۰۰-۹۰۰۰ برای نانوسیال با سیال پایه‌ی اتیلن گلیکول و آب به ترتیب، نگه‌داشته شد. با افزایش ۱٪ حجمی از نانوذرات به سیال پایه‌ی آب یا اتیلن گلیکول، یک افزایش ۴۰ درصدی در عدد ناسلت در مقایسه با سیال خالص ثبت شد [۱۱].

در این مقاله سیالات خنک‌کننده‌ی آب خالص و نانوسیال اکسید آلومینیم در سه درصد وزنی (۰/۱، ۰/۳ و ۱ درصد) به صورت آزمایشگاهی در رادیاتور خودرو ۲۰۶ برای بررسی انتقال حرارت استفاده و با هم مقایسه شده‌اند که در ادامه به ارائه‌ی نتایج حاصل می‌پردازیم.

۲- نانوسیال

نانوسیالات که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می‌شوند، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی هستند. اندازه ذرات مورد استفاده در نانوسیالات از ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. نانوسیال گونه‌ی جدیدی از محیط‌های انتقال حرارت است که توانایی بسیار زیادی در انتقال حرارت از خود نشان می‌دهد. این سیالات با افزودن ذرات فلزی و غیرفلزی در مقیاس نانو به سیال پایه تحت تکنیک‌های خاص تولید می‌شوند. این ذرات به صورت سوسپانسیون باقی می‌مانند و مسأله‌ی ساییدگی در تجهیزات و خطوط انتقال ایجاد نمی‌نمایند. ذرات معلق نانو در سیال سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی شده و بر اثر حرکت ذرات انتقال حرارت جابجایی بسیار افزایش پیدا می‌کند. نانوسیالات کاربردهای فراوانی در مبدل‌های حرارتی، صنایع هوافضا، نیروگاه‌ها و ... دارند و در تمامی موارد، انرژی مصرفی سیستم را کاهش می‌دهند و با بهبود طراحی امکان تولید سیستم‌های فشرده را ایجاد می‌نمایند. استفاده از نانوسیالات می‌تواند به دلیلی شدت انتقال حرارت زیاد آن‌ها، مصرف آب صنایع را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. از جمله عوامل انتقال حرارت در نانوسیالات، عبارتند از: حرکت نانو ذرات، سطح مولکولی لایه‌ای مایع در سطح مشترک مایع با ذرات، انتقال حرارت پرتابه‌ای در نانو ذرات و تأثیر خوشه‌ای شدن نانو ذرات از جمله عوامل انتقال حرارت در نانوسیالات می‌باشند.

بهبود خواص حرارتی نانوسیال احتیاج به انتخاب روش تهیه‌ی مناسب این سوسپانسیون‌ها دارد تا از ته‌نشینی و ناپایداری آن‌ها جلوگیری شود. تهیه نانو سیال پایا و بادوام شرط لازم برای بهینه شدن خواص آن است. اجتماع ذرات و کلوخه شدن آن‌ها باعث افزایش احتمال ته‌نشینی شده، پایداری سوسپانسیون را کاهش می‌دهد و موجب از بین رفتن ویژگی‌های سوسپانسیون از جمله هدایت حرارتی ویسکوزیته و افزایش ظرفیت حرارتی می‌شود. متناسب با کاربرد، انواع بسیاری از نانوسیالات از جمله



نانوسیال اکسید فلزات، نیتريت‌ها، کربید فلزات و غیر فلزات که به‌وسیله یا بدون استفاده از مواد فعال سطحی (سورفکتانت^۱) در سیالاتی مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن به‌وجود آمده است. دو روش عمده برای تهیه نانوسیالات وجود دارد که روش دومرحله‌ای و روش یک مرحله‌ای هستند.

۲-۱- روش دومرحله‌ای

مرحله نخست این روش شامل تولید نانو ذرات به صورت یک پودر خشک بوده که اغلب توسط کندانس نمودن با یک گاز بی‌اثر انجام می‌شود. در این مرحله ابتدا نانوذره یا نانولوله معمولاً به‌وسیله روش رسوب بخار شیمیایی (CVD) در فضای گاز بی‌اثر به‌صورت پودرهای خشک تهیه می‌شود. استفاده از گاز بی‌اثر باهدف جلوگیری از تشکیل اکسیدهای فلزی است. در صورتی که هدف تهیه نانو ذرات اکسید فلزی باشد به‌جای گاز بی‌اثر از اکسیژن استفاده می‌کنند. در مرحله‌ی بعد نانوذره یا نانولوله در داخل سیال پراکنده می‌شود. برای این کار از روش‌هایی مانند لرزاننده‌های مافوق صوت و یا از سورفکتانت‌ها استفاده می‌شود تا توده‌های نانوذره‌ای به حداقل رسیده و باعث بهبود رفتار پراکندگی شود.

روش دومرحله‌ای برای تولید انبوه روش مناسبی است اما این مشکل را دارد که ممکن است ذرات قبل از پراکندگی کامل داخل سیال در اثر نیروهای قوی واندروالس به هم بچسبند و گروهی از آن‌ها در مایع رسوب کنند و موجب کاهش ضریب هدایت حرارتی شوند. روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی برای حل این مشکل ارائه شده است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به ارتعاش مافوق صوت، قرار دادن نانو سیال در معرض برش بالا، استفاده از مواد فعال‌کننده‌ی سطح و تغییرات اسیدیته اشاره کرد.

روش دو مرحله‌ای برای بعضی موارد مانند اکسید فلزات در آب، دیونیزه شده بسیار مناسب است و برای نانو سیالات شامل نانو ذرات فلزی سنگینی، کمتر موفق بوده است. روش دو مرحله‌ای دارای مزایای اقتصادی بالقوه‌ای است، زیرا شرکت‌های زیادی توانایی تهیه نانو پودرها در مقیاس صنعتی را دارند [۱۲].

۲-۲- روش یک مرحله‌ای

روش یک مرحله‌ای نیز به‌موازات روش دومرحله‌ای پیشرفت کرده است. در این روش از یک مرحله که تبخیر مستقیم است استفاده می‌گردد. مزیت استفاده از این روش آن است که تجمع ذرات بر اثر چسبندگی آن‌ها به یکدیگر به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و به حداقل می‌رسد.

به‌طور مثال نانوسیالاتی شامل نانوذرات فلزی با استفاده از روش تبخیر مستقیم تهیه شده‌اند. در این روش، منبع فلزی تحت شرایط خلأ تبخیر می‌شود. در این روش، تراکم توده نانوذرات به حداقل خود می‌رسد، اما فشار بخار پایین سیال یکی از معایب این فرآیند محسوب می‌شود؛ ولی با این‌حال روش‌های شیمیایی تک مرحله‌ای مختلفی برای تهیه نانوسیال به‌وجود آمده است که از آن جمله می‌توان به روش احیای نمک فلزات و تهیه‌ی سوسپانسیون آن در حلال‌های مختلف برای تهیه‌ی نانوسیال فلزات اشاره کرد. مزیت اصلی روش یک مرحله‌ای، کنترل بسیار مناسب روی اندازه و توزیع اندازه‌ی ذرات است [۱۲].

¹. Surfactant



۳- تعیین خواص نانوسیال

با فرض اینکه نانوذرات به خوبی در داخل سیال پایه توزیع شده است، یعنی می‌توان غلظت ذرات را در کل سیستم یکنواخت فرض کرد؛ خواص ترموفیزیکی نانوسیالات در دماها و غلظت‌های مختلف با استفاده از برخی فرمول‌های کلاسیک که به طور معمول برای جریان دوفاز استفاده شده است قابل ارزیابی هستند. در کار حاضر روابط زیر برای محاسبه‌ی چگالی و گرمای ویژه‌ی نانوسیالات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. توضیح اینکه در این روابط، ϕ کسر حجمی نانوذرات است که به سیال پایه اضافه شده است. زیرنویس‌های nf ، bf و p به ترتیب بیانگر خصوصیات مربوط به سیال پایه، نانوسیال و نانوذرات می‌باشد.

۳-۱- چگالی

براساس فیزیک حاکم بر مخلوط دو ماده خواهیم داشت:

$$(\rho_{nf}) = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (1)$$

۳-۲- ظرفیت گرمایی ویژه

برای تعیین ظرفیت گرمایی ویژه‌ی نانوسیال از روش ارائه شده توسط پک و چو [۱۳] استفاده شده است:

$$C_{P_{nf}} = (1 - \phi)C_{P_{bf}} + \phi C_{P_p} \quad (2)$$

۳-۳- لزجت دینامیکی

روابط مختلفی برای محاسبه‌ی لزجت دینامیکی نانوسیال ارائه شده است که در مقاله‌ی حاضر از رابطه‌ی زیر استفاده

می‌نمائیم [۱۴]:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\phi) \quad (3)$$

۳-۴- ضریب هدایت حرارتی

برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، رابطه‌ی همیلتون-کروسر به صورت زیر ارائه شده است، [۱۵]:

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \frac{K_p + 2K_{bf} - 2\phi(K_{bf} - K_p)}{K_p + 2K_{bf} + \phi(K_{bf} - K_p)} \quad (4)$$

۴- تشریح سیستم آزمایشگاهی

سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در این کار، موتور ۲۰۶ تیپ دو شامل کلیه‌ی تجهیزات و سیستم خنک‌کاری کامل آن می‌باشد که بر روی استند ثابت شده است. ترموستات سیستم خنک‌کاری موتور برداشته شده است و به‌محض روشن کردن موتور، مایع خنک‌کننده‌ی موتور شروع به گردش در سیستم خنک‌کاری می‌نماید. موتور مورد مطالعه و تجهیزات آن در شکل (۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که حجم کل سیال موجود در سیستم ۶ لیتر می‌باشد.



شکل (۱) موتور TU3 (تیپ ۲) مورد مطالعه در کار حاضر و متعلقات آن.

رادیاتور مورد بررسی در کار پیش‌رو، مختص اتومبیل پژو ۲۰۶ تیپ دو با موتور TU3 و از جنس آلومینیوم می‌باشد. این رادیاتور دارای ۵۹ لوله‌ی عمودی به ارتفاع ۳۹/۹ سانتی‌متر و سطح مقطع بیضوی به قطرهای ۱۶/۵ و ۱/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. اطلاعات کامل‌تر از هندسه‌ی این رادیاتور در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات رادیاتور موتور مورد مطالعه.

جنس فین و لوله	آلومینیوم
نوع فین	موج‌دار
ابعاد فین (عرض*ارتفاع*طول)	۳۸۶/۵×۲۷×۷/۵۲ mm
تعداد فین	۶۰
حجم رادیاتور	۱/۲ لیتر

به منظور اندازه‌گیری دما در این کار از ترمیستورهای PT استفاده شده است. در این سنسورها با افزایش دما، مقاومت افزایش می‌یابد. در این سیستم آزمایشگاهی، سه عدد سنسور دمای ۱۰۰ اهم و سه عدد مولتی‌متر دیجیتال برای اندازه‌گیری دمای بدنه رادیاتور بر روی بدنه رادیاتور نصب شد. دو سنسور PT در ورودی و خروجی رادیاتور نصب شده و سنسور سوم نیز روی بدنه‌ی رادیاتور نصب گردید تا دمای بدنه‌ی رادیاتور اندازه‌گیری شود. شکل (۲) این سنسورها و محل نصب آن‌ها را نشان می‌دهد. برای خواندن دمای سنسورهای رادیاتور از نمایشگر دیجیتال و برای ثبت دمای خروجی موتور و دور موتور از دستگاه دیاگ استفاده شده است.

مجموعه مقالات هشتمین همایش ملی مبدل گرمایی

دوم دی ماه ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

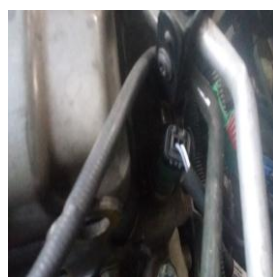
www.Mobadel.ir



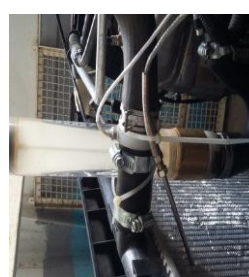
(ب) سنسور دمای ورودی
رادیاتور



(الف) سنسور دمای خروجی
رادیاتور



(د) سنسور دمای آب موتور



(ج) سنسور دمای بدنه
رادیاتور

شکل (۲) سنسورهای دما و محل نصب آن‌ها.

برای اندازه‌گیری دبی جریان در این کار از روتامتر استفاده شده است. روتامتر مورد استفاده در این سیستم آزمایشگاهی از نوع خطی می‌باشد. این روتامتر از نوع LZT-2520G با محدوده‌ی اندازه‌گیری ۲۰-۲ GPM و دقت اندازه‌گیری $\pm 4\%$ درصد می‌باشد. همچنین، روتامتر به صورت مستقیم و عمود بر لوله‌ی آب که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، نصب گردیده است.



شکل (۳) محل و چگونگی نصب روتامتر در سیستم آزمایشگاهی

۵- روش تهیه نانوسیالات

آماده‌سازی یک نانوسیال پایدار در کاربرد انتقال حرارت آن‌ها دارای اهمیت بسیار بالایی است. از آنجا که همواره نانوذرات به دلیل نیروهای بسیار قوی وان‌دروالسی تمایل به تشکیل توده دارند، آماده‌سازی یک سوسپانسیون همگن از مشکلات بزرگ کار با نانوسیالات است.

مقدار جرم معینی از نانوذرات برای ایجاد درصد وزنی مشخص جدا می‌گردد. این مقدار جرم مشخص همراه با مقدار سیال موردنیاز به مدت ۳۰ دقیقه توسط همزن مغناطیسی همزده شده و سپس به مدت ۱۵ دقیقه به صورت پالس تحت امواج آلتراسونیک قرار گرفته است. زمان بهینه برای اعمال امواج آلتراسونیک بعد از آزمایش‌های متفاوت به دست آمده است. در این کار آزمایشگاهی از دستگاه آلتراسونیک با توان ۵۰۰ وات و فرکانس ۵۰ کیلوهرتز استفاده شده است. به منظور جلوگیری از افزایش دمای نانوسیال در حین استفاده از دستگاه آلتراسونیک از ظرف آب سرد استفاده شده است. نانوسیال تولیدشده در طول انجام آزمایش ۴۸ ساعت پایدار می‌ماند. خواص نانوپودر اکسید آلومینیوم در جدول (۲) ارائه شده است. نمونه نانوسیال اکسید آلومینیوم تحت امواج آلتراسونیک در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول (۲) خواص نانوپودر اکسید آلومینیوم

مشخصات	اکسید آلومینیوم
شکل ظاهری	سفید کروی
خلوص	۹۹ درصد
اندازه ذره (nm)	۲۰
مساحت سطح ویژه (m^2 / g)	۲۰۰
چگالی (kg / m^3)	۳۸۹۰
ظرفیت حرارتی ویژه ($J / kg.K$)	۸۸۰
ضریب هدایت حرارتی ($W / m.K$)	۳۶



شکل (۴) نمونه نانوسیال اکسید آلومینیوم تحت امواج آلتراسونیک.



۶- روش تست و جمع آوری داده‌ها

ابتدا موتور و مخزن انبساط با استفاده از آب و نانوسیالات با غلظت مشخص پر شد. سپس موتور روشن شد تا دمای سیال خنک‌کننده بالا برود. در ابتدای آزمایش در دور آرام موتور (۸۳۲ RPM) دبی جریان سیال خنک‌کننده برابر با ۱۱ لیتر در دقیقه بود اندازه‌گیری شد. در هر مرحله از آزمایش با بالا بردن دور موتور از ۸۳۲ RPM تا ۱۸۲۴ RPM، دبی جریان سیال از ۱۱ تا ۳۰ لیتر در دقیقه تنظیم گردید. همچنین، دبی جریان برای دو دور تند و متوسط فن که با کلید مستقیم از باطری راه‌اندازی می‌شود، جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. دمای ورودی و خروجی رادیاتور توسط سنسورهای PT و نمایشگر و همچنین دمای سطح رادیاتور با استفاده از سنسور PT نصب‌شده روی رادیاتور و مولتی‌مترها ثبت شدند. مدت زمان متوسطی که سیستم در طول آزمایش‌ها به تعادل می‌رسد، حدود ۸ دقیقه است که به جهت اطمینان از پایداری ثبت نتایج پس از ۱۵ دقیقه از شروع کارکرد سیکل موردنظر، نتایج خوانده و ثبت شدند.

۷- نتایج

آزمایش‌های موردنظر برای آب معمولی و نانوسیال اکسید آلومینیوم با سه درصد وزنی ۰/۱، ۰/۳ و ۱ انجام شده است. در ادامه به ارائه‌ی نتایج مربوط به هریک از این سیالات خنک‌کننده و تفسیر آن‌ها خواهیم پرداخت.

۷-۱- اعتبارسنجی

به منظور انجام آزمایش‌ها، ابتدا لازم است که نتایج و قابلیت اطمینان تجهیزات آزمایشگاهی اعتبارسنجی شوند. در کار حاضر این مسئله با مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و تئوری عدد ناسلت برای آب خالص مورد بررسی قرار گرفته است. عدد ناسلت تئوری از رابطه‌های تجربی دیتوس-بولتر^۱ (رابطه‌ی (۵)) یا گنیلینسکی^۲ (رابطه‌ی (۶)) قابل محاسبه است.

$$NU = 0.0236 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (5)$$

$$NU = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (6)$$

در این روابط، Re عدد رینولدز جریان و Pr عدد پراندل سیال خنک‌کننده می‌باشد. همچنین مقدار f در رابطه‌ی (۶) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f = (0.79 \ln(Re) - 1.69)^{-2} \quad (7)$$

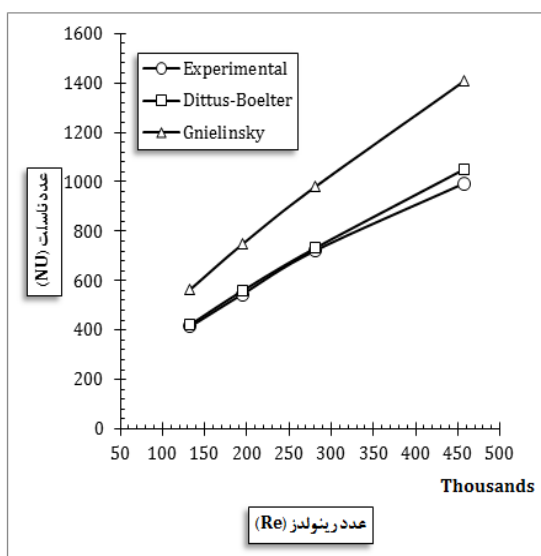
رابطه‌ی دیتوس-بولتر برای $0.6 \leq Pr \leq 160$ و $Re \gg 10000$ معتبر است. همچنین رابطه‌ی گنیلینسکی برای $3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$ و $0.5 \leq Pr \leq 2000$ معتبر می‌باشد.

نمودار تغییرات عدد ناسلت برحسب عدد رینولدز جریان برای دور تند فن در شکل (۵) نشان داده شده است. نمودار متناظر با دور متوسط فن نیز در نمودار شکل (۶) ارائه گردیده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نحوه‌ی تغییرات عدد ناسلت

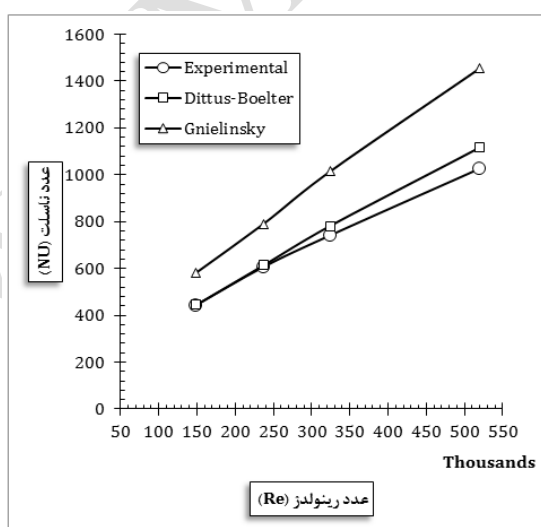
¹. Dittus-Boelter

². Gnielinsky

آزمایشگاهی حاصل، مطابق با نحوه تغییرات ناسلت تئوری محاسبه شده با استفاده از روابط (۵) و (۶) می‌باشد. همچنین، مشخص است که این نتایج با مقادیر حاصل از رابطه دیتوس-بولتر مطابقت بسیار خوبی را نشان می‌دهد. رابطه گنیلینسکی، مقادیر تئوری بیشتری را نسبت به رابطه دیتوس بولتر پیش‌بینی می‌نماید.



شکل (۵) نمودار تغییرات عدد ناسلت آزمایشگاهی و تئوری برحسب عدد رینولدز جریان برای دور تند فن.

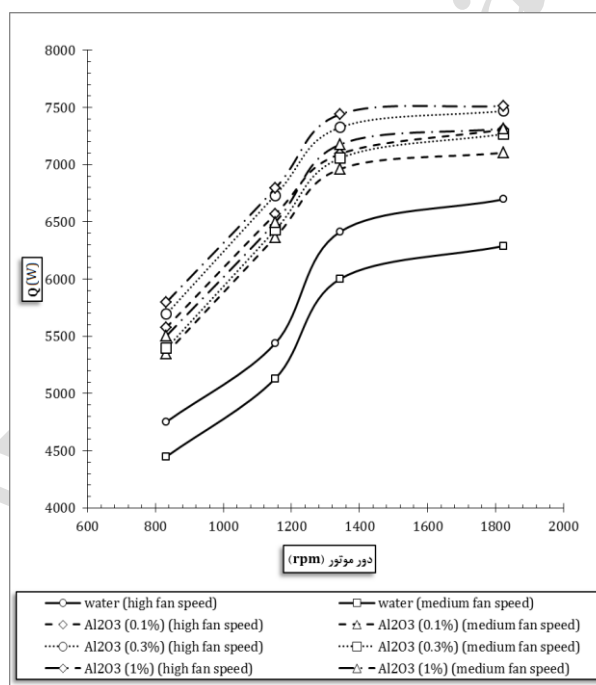


شکل (۶) نمودار تغییرات عدد ناسلت آزمایشگاهی و تئوری برحسب عدد رینولدز جریان برای دور متوسط فن.

مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز جریان که متناظر با افزایش دور موتور می‌باشد، مقدار ناسلت آزمایشگاهی از مقدار ناسلت تئوری دورتر شده و خطا افزایش می‌یابد. حداکثر خطای حاصل از کار آزمایشگاهی نسبت به رابطه دی‌توس-بولتر ۸/۰۷ درصد محاسبه شده است.

۲-۷- سیال خنک‌کننده نانوسیال اکسید آلومینیوم

با به‌کارگیری نانوسیال اکسید آلومینیوم و اندازه‌گیری دمای نقاط مختلف و انجام محاسبات مشخص شد که انتقال حرارت از رادیاتور افزایش یافته است. نمودار تغییرات انتقال حرارت برحسب دور موتور برای این نانوسیال در درصدهای وزنی مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. این نمودار، برای دو حالت دور تند و دور متوسط فن ارائه شده است. همانگونه که پیداست، با افزایش عدد رینولدز جریان که متناظر با افزایش دور موتور است، حرارت دفع‌شده از رادیاتور افزایش پیدا می‌کند. همچنین، مقدار حرارت دفع‌شده برای حالت دور تند فن بیشتر از حرارت دفع‌شده برای حالت دور متوسط فن می‌باشد. برای یک مقدار برابر دور موتور، مقدار حرارت دفع‌شده از رادیاتور برای نانوسیال بیشتر از آب معمولی بوده و این مقدار با افزایش درصد وزنی نانوسیال، افزایش بیشتری دارد. یعنی حرارت دفع‌شده از رادیاتور برای درصد وزنی بیشتر نانوسیال بیشتر خواهد بود.



شکل (۷) نمودار حرارت دفع‌شده برحسب دور موتور برای آب و نانوسیالات اکسید آلومینیوم با درصدهای وزنی مختلف و دورهای تند و متوسط فن.

۸- بحث و نتیجه‌گیری

پروژه‌ی حاضر با هدف بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیم در انتقال حرارت رادیاتور خودروی پژو ۲۰۶ (موتور TU3) انجام شده است. به همین منظور، موتور مورد نظر و تجهیزات آزمایشگاهی مناسب فراهم شدند. در مرحله‌ی اول تست‌های آزمایشگاهی، آب خالص به عنوان سیال خنک‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن نانوسیالات موردنظر به کار برده شدند.

نتایج حاصل از این کار آزمایشگاهی نشان‌دهنده‌ی افزایش میزان انتقال حرارت از رادیاتور خودرو در صورت استفاده از نانوسیال مورد مطالعه (نانوسیال اکسید آلومینیم) می‌باشد. جدول‌های (۴) تا (۶) درصد‌های افزایش عدد ناسلت جریان و حرارت دفع‌شده از رادیاتور را برای دو حالت دور تند و متوسط فن به ترتیب برای نانوسیالات اکسید آلومینیم با درصد‌های وزنی ۰/۱، ۰/۳ و ۱ درصد نشان می‌دهند.

جدول (۴) تغییرات عدد ناسلت و حرارت دفع‌شده از رادیاتور برای نانوسیال اکسید آلومینیم با درصد وزنی ۰/۱ نسبت به آب خالص.

دور موتور (rpm)	دور تند فن		دور متوسط فن	
	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)
۸۳۲	+۱۶/۶۷	+۲۰/۳۲	+۱۸/۱۹	+۱۷/۳۸
۱۱۵۲	+۱۶/۷۴	+۲۴/۳۵	+۱۰/۳۵	+۲۱/۰۴
۱۳۴۴	+۲۴/۰۱	+۱۶/۲۶	+۲۷/۷۷	+۱۰/۵۹
۱۸۲۴	+۲۳/۳۰	+۱۳/۲۲	+۱۵/۹۰	+۹/۱۱

جدول (۵) تغییرات عدد ناسلت و حرارت دفع‌شده از رادیاتور برای نانوسیال اکسید آلومینیم با درصد وزنی ۰/۳ نسبت به آب خالص.

دور موتور (rpm)	دور تند فن		دور متوسط فن	
	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)
۸۳۲	+۱۹/۳۴	+۲۱/۲۸	+۱۹/۸۱	+۲۰/۶۵
۱۱۵۲	+۱۸/۲۳	+۲۵/۳۱	+۱۴/۲۵	+۲۳/۸۲
۱۳۴۴	+۲۸/۲۲	+۱۷/۵۷	+۲۹/۴۲	+۱۴/۲۱
۱۸۲۴	+۲۵/۰۱	+۱۵/۵۶	+۱۷/۴۷	+۱۱/۵۳

جدول (۶) تغییرات عدد ناسلت و حرارت دفع‌شده از رادیاتور برای نانوسیال اکسید آلومینیم با درصد وزنی ۱ نسبت به آب خالص.

دور موتور (rpm)	دور تند فن		دور متوسط فن	
	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)
۸۳۲	+۲۵/۹۹	+۲۶/۵۷	+۲۳/۳۷	+۲۴/۸۰
۱۱۵۲	+۲۴/۹۵	+۲۹/۵۲	+۱۸/۴۵	+۲۷/۸۰



+۱۸/۶۸	+۳۷/۸۹	+۲۲/۳۴	+۳۳/۳۲	۱۳۴۴
+۱۴/۷۷	+۲۳/۸۸	+۱۹/۰۲	+۳۱/۷۲	۱۸۲۴

بیشترین میزان افزایش در انتقال حرارت برای نانوسیال اکسید آلومینیم در درصد وزنی ۱ درصد و دور موتور ۱۱۵۲ دور در دقیقه مشاهده شد.

با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت که استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیم در اعداد رینولدز بالا، جنبش و برهم کنش بین نانوذرات و مجرای دیواره باعث افزایش انتقال حرارت شده است. استفاده از نانوسیال علاوه بر افزایش هدایت حرارتی باعث افزایش پدیده‌هایی نظیر حرکت براونی و مهاجرت ذره شده که افزایش انتقال حرارت را به دنبال دارد. علاوه بر افزایش قابل ملاحظه هدایت حرارتی، از عوامل دیگر افزایش انتقال حرارت در استفاده از نانوسیال می‌توان به افزایش آشفستگی گردابه‌ها و بزرگ شدن ضخامت لایه مرزی اشاره کرد. در نانوسیالات هدایت حرارتی افزایش یافته است. از طرفی افزایش غلظت حجمی نانوسیال باعث افزایش ویسکوزیته می‌شود که این پارامتر تأثیر منفی در انتقال حرارت دارد. بنابراین با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت که تأثیر افزایش هدایت حرارتی به مراتب بیشتر از تأثیر منفی افزایش ویسکوزیته نانوسیال است. بنابراین می‌توان گفت که کاربرد نانوسیالات موجب افزایش انتقال حرارت در رادیاتور خودرو شده و کارایی سیستم را افزایش می‌دهد. این ویژگی امکان طراحی رادیاتورهای کوچک‌تر و سبک‌تر را فراهم می‌نماید.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی را از اداره کل آموزش فنی و حرفه‌ای استان گیلان و مرکز آموزش فنی و حرفه‌ای شهید مطهری رشت در راستای همکاری از این کار تحقیقاتی اعلام می‌نمایند.

فهرست علائم

ρ	چگالی (kg / m^3)
ϕ	کسر حجمی
μ	لزجت دینامیکی (Pa.s)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($J / kg.K$)
K	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
NU	عدد ناسلت
Pr	عدد پранدل
Q	حرارت (w)
Re	عدد رینولدز



مراجع:

- [1] Kakac S., Bergles A. E., Mayinger F. and Yuncu H., Heat transfer enhancement of heat exchangers, vol. 355, Springer, (1999).
- [2] Das SK., Choi SUS., Yu W. and Pradeep T., Nanofluids, *science and technology*, Wiley-Interscience; (2008).
- [3] Ghadimi A., Saidur R. and Metselaar H.S.C., A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4051–4068 (2011).
- [4] Maxwell J. C., A treatise on electricity and magnetism, *Clarendon*, (1955).
- [5] Choi S. U. and Eastman J., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Argonne National Lab., IL (United States)*, pp. (1995).
- [6] Masuda H., Ebata A., Teramae K. and Hishinuma N., Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles Dispersion of Al_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 Ultra-Fine Particles, *Netsu Bussei*, Vol. 7, No. 4, pp. 227-233, (1993).
- [7] Mahian O., Mahmud S. and Zeinali Heris S., Effect of Uncertainties in Physical Properties on Entropy Generation Between Two Rotating Cylinders With Nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 134, No. 10, pp. 101704-101704, (2012).
- [8] Das SK., Putra N., Thiesen P. and Roetzel W., Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *Journal of Heat Transfer*; 125(4): 567-74, (2003).
- [9] Peyghambarzadeh SM., Hashemabadi SH., SeifiJamnani M. and Hoseini SM., Improving the cooling performance of automobile radiator with Al_2O_3 /water nanofluid, *Applied Thermal Engineering*; 31:1833-8, (2011).
- [10] Elias MM., Mahbubul IM., Saidur R., Sohel MR., Shahrul IM. and Khaleduzzaman SS., Experimental investigation on the thermo-physical properties of Al_2O_3 nanoparticles suspended in car radiator coolant, *International Communities Heat Mass Transfer*; 54:48e53, (2014).
- [11] Peyghambarzadeh SM., Hashemabadi SH., Hoseini SM. and Seifi JM., Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators, *International Communities Heat Mass Transfer*; 38:1283e90, (2011).
- [12] J. Selinger, E. V. Timofeeva, A. N. Gavilov, J. M. McCloskey and Y. V. Tolmachev, "Thermal Conductivity and Particle Agglomeration in Alumina Nanofluids: Experiment and Theory", Chemical Physics Publications, Kent State University, (2007).
- [13] Pak B.C., Cho I.Y., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with sub-micron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer*, 11, 151e170, (1998).
- [14] Einstein A., Investigations on the Theory of the Brownian movement, *Dover Publications Inc.*, New York, (1956).
- [15] Xiang Q-W and Arun SM., A review of nanofluids-part I: theoretical and numerical investigations, *Brazil Journal of Chemistry Engineering*; 25(4):613e30, (2008).