



Investigation of the effect of Al_2O_3 nanofluid in M13NI engine cooling system

Bahman Rahmatinejad^{*}, Hossein Rahimi Asiabaraki, Farzin Azimpour Shishevan

Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Nanofluid
Nanoparticles
Heat Transfer Coefficient
M13NI Engine
 Al_2O_3

ABSTRACT

In this study, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ nanofluid was used in a laboratory setting to test the thermal performance of the M13NI engine. Al_2O_3 nanoparticles were employed in this experiment along with base fluids made of water and ethylene glycol. We employed 20 nm nanoparticles with volume fractions of 1 to 2%. The outcomes demonstrated that the Al_2O_3 nanofluid made in the first 22 days was stable after being added SDBS sulphate. Additionally, the zeta potential, which was calculated to be 37.7 mv, shows the stability of the nanofluid. The heat transmission and pressure drop rose as the volume fraction of nanoparticles increased, while the merit parameter fell (ratio of heat transfer to pump power). At 1150 RPM and 1% volume fraction of nanoparticles in the water-based fluid, it was found that the heat dissipated increased by 7.2 and 13.1% in comparison to the mixture of water+ethylene glycol and pure water, respectively. When the volume proportion of nanoparticles in the base fluid increases, the radiator's outlet temperature decreases, resulting in a greater difference between the inlet and outlet temperatures and a faster rate of heat transfer. By utilizing nanofluid, it is possible to lower the radiator's size and the volume of the cooling system, so reducing the volume of circulating water and the engine's wasted power.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

^{*} Corresponding author

E-mail address: b_rahmati60@yahoo.com (B. Rahmatinejad)

Received 4 August 2022; Accepted 3 November 2022

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

بررسی اثر نانوسیال Al_2O_3 در سیستم خنک کاری موتور M13NI

بهمن رحمتی نژاد*، حسین رحیمی آسیابارکی، فرزین عظیم پور شیشوان

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

چکیده

در این تحقیق عملکرد حرارتی موتور M13NI با استفاده از نانوسیال $Al_2O_3 + H_2O$ در محیط آزمایشگاهی بررسی شد. در این آزمایش آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال‌های پایه با نانوذرات Al_2O_3 ترکیب و مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق از نانوذرات ۲۰ nm با درصد‌های حجمی ۱ الی ۲ درصد استفاده شد. نتایج نشان داد با اضافه نمودن سورفکتانت SDBS به Al_2O_3 ، نانوسیال تهیه شده در ۲۲ روز اول پایدار است. همچنین مقدار پتانسیل زتا ۳۷.۷ mV برآورد شد که نشان از پایداری نانوسیال دارد. افزایش کسر حجمی نانوذرات، باعث افزایش انتقال حرارت و افزایش افت فشار و همچنین کاهش پارامتر مریت (نسبت انتقال حرارت به قدرت پمپ) شد. در دور ۱۱۵۰ RPM و وجود ۱ درصد کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه آب به ترتیب افزایش ۷/۲ و ۱۳/۱ درصد حرارت دفع شده نسبت به مخلوط آب+اتیلن گلیکول و آب خالص مشاهده شد. افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه موجب کاهش دمای خروجی از رادیاتور شده که این عمل باعث افزایش اختلاف دمای ورودی و خروجی گردیده و نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. با استفاده از نانوسیال می‌توان اندازه رادیاتور و حجم سیستم خنک‌کاری را کوچک نمود و در نتیجه مقدار آب در گردش و توان تلف شده موتور را کاهش داد.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

نانوسیال
نانوذرات
ضریب انتقال حرارت
موتور M13NI
 Al_2O_3



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: b_rahmati60@yahoo.com (بهمن رحمتی نژاد)

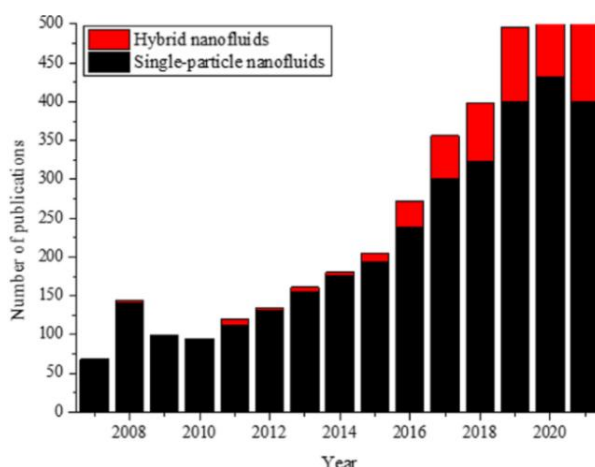
دریافت ۱۳ مرداد ۱۴۰۱؛ پذیرش ۱۲ آبان ۱۴۰۱

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۳۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: B. Rahmatinejad, H. Rahimi Asiabaraki, F. Azimpour Shishevan, Investigation of the effect of Al_2O_3 nanofluid in M13NI engine cooling system, The Journal of Engine Research, 70/1 (2023) 47-65, <https://doi.org/10.22034/er.2023.1975318.0>.

۱- مقدمه

موتورهای احتراق داخلی امروزه کاربردهای فراوانی دارند. در این سیستم، تولید توان با بازده بالا بستگی به عملکرد صحیح در تمام قسمت‌های آن دارد. انتقال حرارت از موتور بایستی به‌صورت کنترل شده در دمای معینی به محیط انجام شود. به صورتی که دمای نقاط مختلف موتور از مقدار مشخصی کمتر یا زیادتر نشود. با توجه به حساس بودن دمای نقاط مختلف موتورهای احتراق داخلی، اهمیت انتقال حرارت در این موتورها بسیار زیاد می‌باشد. به صورتی که اگر این انتقال حرارت در رادیاتور کم یا زیاد شود، دمای قسمت‌های مختلف موتور به‌شدت افزایش یا کاهش می‌یابد [۱]. احتراق مخلوط سوخت و هوا در موتورهای احتراق داخلی، تولید قدرت نموده که بخشی از آن مفید بوده و بخش دیگر آن توسط سیستم خنک‌کننده و اگزوز تلف می‌شود. بیش از ۳۳ درصد انرژی حرارتی تولیدشده موتور توسط سیستم خنک‌کاری منتقل می‌شود و اگر این انتقال حرارت به‌درستی صورت نگیرد گرمای موتور افزایش یافته و با از بین رفتن فیلم روغن مابین قطعات، باعث ساییدگی آن‌ها می‌گردد [۲]. بهترین دمایی که بیشتر موتورهای احتراق داخلی ۴ سیلندر بنزینی در آن کار می‌کنند ۷۰ الی ۹۸ درجه سانتی‌گراد است. سیالات انتقال حرارت مرسوم، نظیر آب و اتیلن‌گلیکول که به‌عنوان سیال عامل خنک‌کننده در رادیاتور اتومبیل‌ها بکار می‌روند، دارای هدایت حرارتی نسبتاً پایینی هستند. نانوسیال‌ها تکنولوژی جدیدی می‌باشند که با افزودن مواد جامد در سایز نانو به سیال پایه به دست می‌آیند. این گروه جدید از سیالات می‌توانند به‌عنوان سیال خنک‌کننده در رادیاتور اتومبیل‌ها استفاده شوند. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود خواص جالب نانوسیال‌ها و پتانسیل زیادی که برای افزایش انتقال حرارت از خود نشان می‌دهند، سبب شده که این گروه از سیالات در سال‌های اخیر در کانون توجه محققان قرار گیرند. افزودن نانوذرات به سیال پایه، تأثیر قابل‌توجهی روی ضریب هدایت حرارتی داشته و این کمیت بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است [۳].



شکل ۱ تعداد مقالات علمی چاپ‌شده بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰ در خصوص نانوسیالات معمولی و هیبریدی [۴]

محققین متعددی در زمینه‌ی بررسی استفاده از نانوسیالات در سیستم خنک‌کننده خودرو، تحقیق نموده‌اند که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. رضازاده و ارکوازی [۵] شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت درون رادیاتور خودرو با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم را انجام داده و نشان دادند افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه موجب افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش دمای خروجی می‌گردد. یعقوبی و همکاران [۶] مطالعه تجربی انتقال حرارت کل در رادیاتور خودرو با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم را انجام داده و نشان دادند که بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت نسبت به آب برای نانوسیال اکسید آلومینیوم در ۱ درصد وزنی و دور موتور 1152 RPM حاصل شد که ۲۹/۵۲ درصد می‌باشد. گانسان و سنی کاناان [۷] اثر استفاده از نانوسیال آب آلومینا را با کسرهای حجمی ۱ درصد و ۴ درصد به‌صورت عددی در رادیاتور خودرو بررسی کردند. نتایج آن‌ها افزایش ۳۱ تا ۴۸ درصدی ضریب انتقال حرارت جابجایی برای کسر حجمی ۱

درصد و افزایش ۵۲ تا ۷۹ درصدی آن برای کسر حجمی ۴ درصد را نشان داد. بازه دمایی مورد مطالعه آن‌ها ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس بود. ژئ و همکاران [۸] افزایش انتقال حرارت را به کمک نانوسیال اکسید آلومینیوم، اکسید قلع، اکسید تیتانیوم و اکسید منیزیم با مخلوطی از آب و اتیلن‌گلیکول با نسبت ۵۵٪ به ۴۵٪ به ترتیب، گزارش دادند. نانوسیال‌های اکسید آلومینیوم، اکسید منیزیم و اکسید قلع، افزایش بالایی در انتقال حرارت در مقایسه با نانوسیال اکسید تیتانیوم داشتند. در مورد نانوسیال اکسید منیزیم در عدد رینولدز ۱۰۰۰، افزایش ۲۵۲ درصدی انتقال حرارت گزارش شد. لئونگ و همکاران [۹] ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار رادیاتور ماشین را با استفاده از نانوذرات مس در اتیلن‌گلیکول به‌عنوان خنک‌کننده بررسی کردند. آن‌ها اثر کسر حجمی نانوذرات مس و تأثیر عدد رینولدز هوا و خنک‌کننده را بر روی عملکرد حرارتی رادیاتور و نیز افت فشار خنک‌کننده و توان پمپ بررسی کردند و نتیجه گرفتند که شدت انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی نانوسیالات زیاد می‌شود. علاوه بر این عملکرد حرارتی رادیاتور با استفاده از نانوسیال با خنک‌کننده اتیلن‌گلیکول با اعداد رینولدز هوا و خنک‌کننده افزایش می‌یابد. همچنین گزارش کردند حدود ۱۲/۱۳ درصد افزایش در توان پمپ در غلظت ۲ درصد نانوذرات مس در دبی حجمی ۰/۲ مترمکعب بر ثانیه نسبت به سیال پایه لازم است. پیغمبرزاده و همکاران [۱۰] رادیاتور ماشین را با نانوسیال اکسید آلومینیوم با سیال پایه‌ی آب آزمایش کردند. غلظت حجمی در بازه ۰/۱-۱ درصد متغیر بود. بیشترین افزایش انتقال حرارت بالغ بر ۴۵ درصد با غلظت حجمی ۱ درصد گزارش شد. پیغمبرزاده و همکاران [۱۱] مجدداً یک رادیاتور خودرو را با نانوسیالات اکسید مس و اکسید آهن با سیال پایه‌ی آب در سه غلظت حجمی ۰/۱۵، ۰/۴ و ۰/۶۵ درصد آزمایش کردند. عدد رینولدز از ۵۰ تا ۱۰۰۰ و دمای ورودی خنک‌کننده از ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. هر دو نانوسیال یک افزایش ۹ درصد را در ضریب کلی انتقال حرارت در مقایسه با آب خالص نشان دادند. نارکی و همکاران [۱۲] نتایج تجربی برای نانوسیال آب و اکسید مس را تحت حالت جریان لایه‌ای در رادیاتور خودرو گزارش کردند. غلظت حجمی از صفر تا ۰/۴ درصد و دمای ورودی از ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. یک افزایش ۸ درصد در ضریب کلی انتقال حرارت در مقایسه با آب خالص برای کسر حجمی ۰/۴ درصد نانوسیال گزارش شد. حسین و همکاران [۱۳] نانوسیال‌های اکسید تیتانیوم و اکسید سیلیسیم با سیال پایه‌ی آب را در رادیاتور خودرو تحت حالت جریان ورقه‌ای آزمایش کردند. غلظت حجمی و دمای ورودی در بازه ۱-۲ درصد و ۸۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد متغیر بودند. بیشترین افزایش ۱۱ درصد و ۲۲/۵ درصد در مقایسه با سیال خالص به ترتیب برای نانوسیال اکسید تیتانیوم و اکسید سیلیسیم به دست آمد. علی و همکاران [۱۴] تأثیر استفاده از نانوسیال آب / اکسید روی را بر روی رادیاتور خودرو بررسی نمودند. این مطالعه برای درصدهای حجمی مختلف انجام شد. بهترین افزایش در انتقال حرارت، مقدار ۴۶ درصد برای درصد حجمی ۰/۲ گزارش شد. راجا و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۶ به مروری بر مشخصات نانوسیال‌ها، مشخصات انتقال حرارتی و کاربردهای آن پرداختند. آن‌ها مطالعات اخیر محققان را بررسی نمودند و متوجه شدند در تحقیقات انجام شده جنبه‌های مختلف نانوسیال‌ها از جمله رسانایی گرمایی، ویسکوزیته، مطالعات تجربی، مطالعات عددی انتقال حرارت و کاربردهای نانوسیال‌ها مورد توجه بوده است. بیگدلی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۶ به مروری بر پدیده انتقال حرارت و جرم نانوسیال خنک‌کننده با تمرکز ویژه جهت استفاده در خودرو پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تعلیق مهندسی نانوذرات (نانوسیال) می‌تواند مشخصه خواص حرارتی را افزایش دهد. با توجه به افزایش نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده با عملکرد بالا، اخیراً نانوسیال‌ها به‌عنوان ماده سردکننده رادیاتور ماشین شناخته می‌شوند. حیدریگی [۱۷] در تحقیقی به بررسی تأثیر استفاده از نانوسیال مس، نانوسیال نقره و اکسید آلومینیوم بر میزان انتقال حرارت رادیاتور موتور تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ پرداخته و نشان داد در شرایط کاری موتور و شرایط مزرعه‌ای شخم با گاواهن به عمق ۲۰ سانتی‌متر، انتقال حرارت با غلظت‌های ۸ و ۱۲ درصد از نانوسیال مس و نقره و اکسید آلومینیوم به ترتیب ۱۶، ۳۲، ۱۱/۳ و ۱۳ درصد افزایش یافت. رحمتی‌نژاد و همکاران [۱۸] ارزیابی تجربی انتقال حرارت رادیاتور تراکتور MF 285 با استفاده از نانوسیال $Al_2O_3 + water$ را انجام دادند. برای این منظور مدل

آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد و از نانوذرات ۲۰ nm با درصدهای حجمی ۱ الی ۴ درصد استفاده شد. دمای سیال ورودی به رادیاتور حداکثر ۸۵ درجه سانتی‌گراد و دبی جریان سیال خنک‌کننده ۱۵/۰۸-۳/۱۸ لیتر بر دقیقه و سرعت جریان هوا از ۳/۲-۶/۴ متر بر ثانیه متغیر بود. نتایج نشان داد افزایش سرعت جریان مایع خنک‌کننده و سرعت جریان هوا می‌تواند عملکرد انتقال حرارت را بهبود دهد، همچنین افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه موجب افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش دمای خروجی می‌گردد؛ بنابراین با افزایش دور الکتروموتور از ۲۰ Hz به ۴۰ Hz ضریب انتقال حرارت آب خالص به‌طور متوسط ۲۶ درصد و نانوسیال ۲۹ درصد افزایش را نشان می‌دهد. با افزودن ۴ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه می‌توان نرخ انتقال حرارت را به‌طور متوسط ۳۷ درصد و ضریب انتقال حرارت جابجایی را ۲۸ درصد نسبت به سیال پایه افزایش داد. قاسمی زوارق [۱۹] بهینه‌سازی سیستم خنک‌کاری یک موتور احتراق داخلی بنزینی جهت کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های خروجی از آگروز را انجام داد. نتایج نشان داد اگر از یک برنامه خوب و کامل برای کنترل پمپ آب برقی و ترموستات الکترونیکی استفاده شود در مقایسه با سیستم کلاسیک علاوه بر بالا رفتن عمر قطعات موتور، میزان مصرف سوخت حداقل ۱/۱۹ درصد و حداکثر ۴/۳۳ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مدت‌زمان گرم شدن موتور حداقل ۶/۲۵ درصد و حداکثر ۱۸/۸۴ درصد کم می‌شود علاوه بر این‌ها آلایندگی‌های HC و NO در اکثر تست‌ها به ترتیب حداقل ۱۵/۳۲ درصد، حداکثر ۷۰ درصد و حداقل ۹/۲۸ درصد، حداکثر ۴۶/۵۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

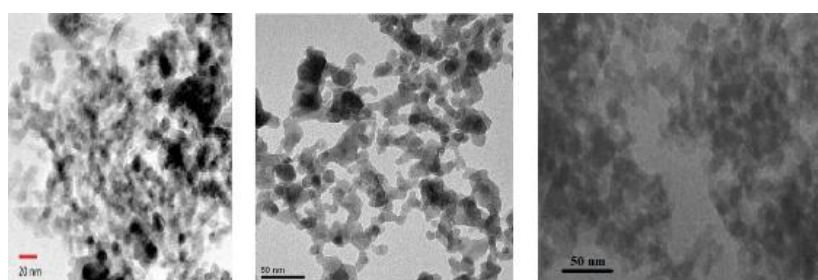
در تحقیق حاضر به بررسی اثر استفاده از نانوسیال Al_2O_3 در سیستم رادیاتور خودرو به‌صورت تجربی پرداخته شد. این تحقیق به‌صورت آزمایشگاهی بر روی موتور واقعی در سه حالت آب خالص، آب و اتیلن‌گلیکول (۶۰:۴۰) و در نهایت با نانوسیال $Al_2O_3 + H_2O$ با کسرهای حجمی و دبی‌های مختلف انجام شد. عدم وجود مطالعات مشابه به‌صورت جامع در این خصوص و ناکارآمدی روابط و مدل‌های آزمایشگاهی طراحی شده در تعیین دقیق تأثیر استفاده از نانوسیالات بر میزان انتقال حرارت و از طرفی ارائه نتایج ضدونقیض توسط پژوهشگران در این مورد، سبب شد نویسندگان به فکر تست تجربی بر روی موتور واقعی بیفتند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نانوسیال

۲-۱-۱- تهیه تصاویر TEM و SEM نانوذرات

در این تحقیق ابتدا نانوذرات Al_2O_3 توسط دستگاه PNC1k-C شرکت پیام‌آوران نانو فن‌آوری فردانگر به روش انفجار الکتریکی سیم به‌صورت نانوکلوئیدهای فلزی تولید شد. برای به دست آوردن ساختار و مورفولوژی نانوذرات تولیدشده، تصاویر TEM توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری مدل H9500 و تصاویر SEM توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Su3500 شرکت HITACHI گرفته شد. شکل ۲ تصاویر TEM و SEM نانوذرات تولیدشده را نمایش می‌دهد.



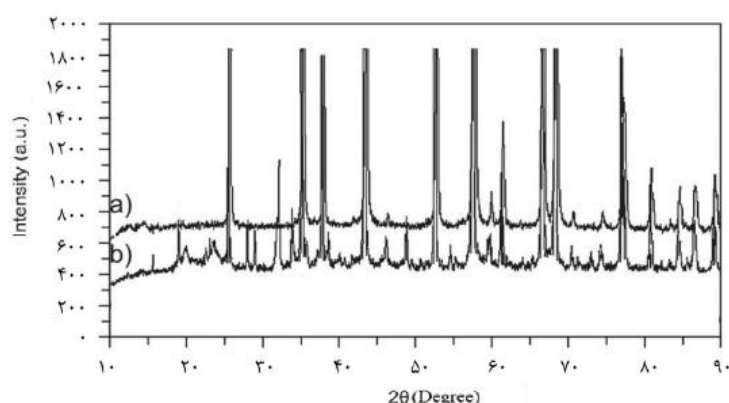
شکل ۲ تصویر نانوذرات Al_2O_3 (الف) TEM 20 nm، (ب) TEM 50 nm، (ج) SEM 50 nm

۲-۱-۲- اندازه گیری قطر نانوذرات به کمک XDR

برای اندازه گیری قطر نانوذرات از روش پراش پرتو X (XDR) استفاده شد. در این روش برای تعیین اندازه نانوذرات، پردازش و آنالیز پرتو X بازگشتی از سطح نمونه بررسی می شود. در روش XDR اندازه ذرات از رابطه ۱ محاسبه می گردد:

$$D = \frac{0.93 \lambda}{B \cos \theta_B} \quad (۱)$$

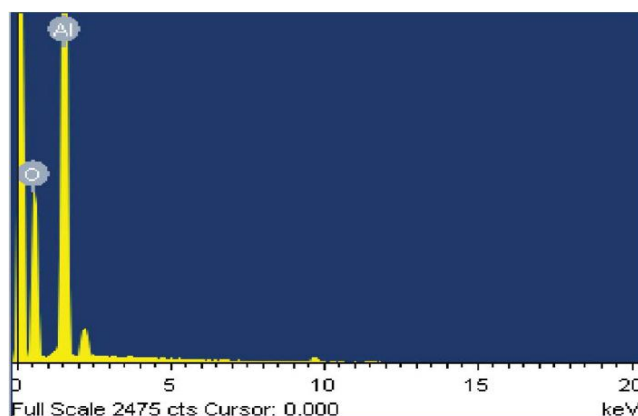
در رابطه فوق D : قطر ذره، K : ضریب شکل (برای نانوذرات کروی $K = 0.93$)، λ : طول موج اشعه ایکس، B : پهنای پیک ماکزیمم در نصف ارتفاع، θ : زاویه پراکندگی می باشد که به ازای آن پیک ماکزیمم شکل گرفته است. طیف XDR از نانوذرات Al_2O_3 در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود نتایج نشان داده شده با منبع JCPDS no. 5-0661 مطابقت دارد [۲۰-۲۱].



شکل ۳ طیف XDR از نانوذرات Al_2O_3 در ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد (a) بدون سولفونات، (b) با سولفونات SDBS

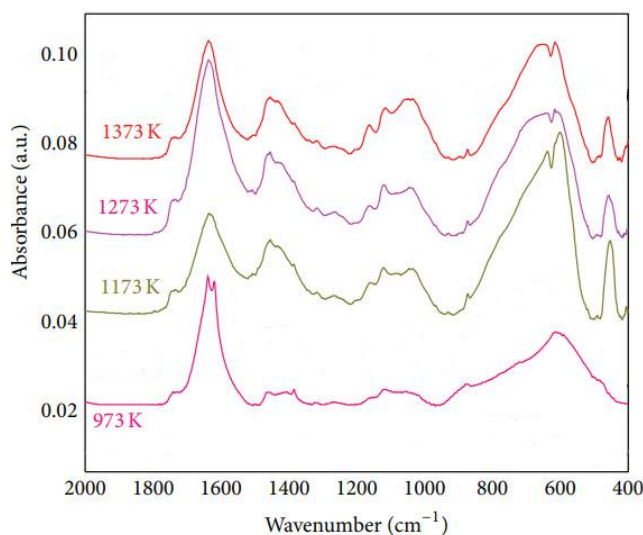
۲-۱-۳- طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS)

EDS به عنوان تجهیزات جانبی دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد استفاده قرار می گیرند. در طیف سنجی EDS، با اندازه گیری انرژی پرتوهای X منتشر شده از نمونه، امکان بررسی کمی و کیفی نمونه میسر می شود. در سیستم EDS، نمونه به وسیله پرتو الکترونی بمباران می شود. در اثر برخورد الکترون ها به نمونه، برخی از الکترون های اتم از جای خودشان خارج می شوند. برای رسیدن اتم به حالت تعادل، الکترون های بالاتر به محل خالی ایجاد شده مهاجرت کرده، جای خالی را پر می کند. برای انجام این عمل، الکترون های تراز بالاتر که دارای انرژی بیشتری هستند، باید بخشی از انرژی خود را از دست بدهند تا به سطح انرژی تراز جدید رسیده، پایدار شوند که در این حالت، انرژی به صورت پرتو X منتشر می شود. مقدار انرژی آزاد شده به ترازهایی که الکترون از آن جدا شده یا به آن مهاجرت کرده، بستگی دارد. از طرفی، اتم های هر عنصر در حین انتقال از تراز به تراز دیگر، پرتو X با مقدار انرژی منحصربه فرد از خودشان ساطع می کنند؛ بنابراین با اندازه گیری مقدار انرژی پرتو X آزاد شده در حین بمباران الکترونی یک نمونه، می توان نوع اتم موجود در آن را مشخص کرد که نتایج آن به صورت یک طیف EDS نشان داده می شود. این نمودار بر اساس میزان دریافت انرژی X از هر تراز انرژی رسم شده است. هر یک از پیک های نشان داده شده در این نمودار، به یک اتم خاص اختصاص دارد. پیک های با ارتفاع بیشتر به معنی غلظت بیشتر عنصر مورد نظر در نمونه است. شکل ۴ نمودار EDS نانوذرات Al_2O_3 با حضور عناصر آلومینیوم و اکسیژن با درصد وزنی ۳۸ و ۶۲ اتمی را بدون ناخالصی نشان می دهد.

شکل ۴ EDS نانوذرات Al_2O_3

۲-۱-۴- روش FT-IR

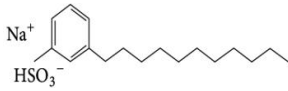
آنالیز FT-IR یا روش طیف‌سنجی مادون‌قرمز، یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌ها برای مطالعه اصلاحات سطحی صورت گرفته بر روی نانوذرات است. در این روش پرتو مادون‌قرمز (IR) از نمونه عبور می‌کند. بخشی از اشعه مادون‌قرمز توسط نمونه جذب و بخشی دیگر از داخل آن عبور می‌نماید. در نتیجه طیف‌ها بر اساس جذب و عبور IR، خواص مولکول‌های نمونه را نشان می‌دهند. در این تکنیک میزان شدت طیف مادون‌قرمز بر اساس طول‌موج جذبی رسم می‌گردد و در پایان تمامی این امواج گردآوری شده و برای تشخیص جذب نمونه تحلیل می‌شود. در این تحقیق برای اندازه‌گیری FT-IR از دستگاه Spectrum 100 ساخت شرکت PerkinElmer استفاده شد. شکل ۵ آنالیز FT-IR از دمای 973 K تا 1373 K را نمایش می‌دهد.



شکل ۵ آنالیز FT-IR از دمای 973 K تا 1373 K

برای تهیه نانوسیال از یک همزن برقی با قابلیت تنظیم دور از ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه استفاده شد و سپس از یک تکان‌دهنده مغناطیسی با سرعت ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه و قدرت گرمایش ۴۰۰ وات استفاده شد. به‌منظور حفظ پایداری محلول برای اینکه برای کارهای مهندسی مناسب باشد از ۱ درصد وزنی مواد فعال‌کننده سطحی (سدیم دودسیل بنزن سولفونات) استفاده شد. مشخصات مواد فعال‌کننده سطحی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات مواد فعال‌کننده سطحی

نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
ماده فعال سطحی	سدیم دودسیل بنزن سولفونات
فرمول مولکولی	$C_{18}H_{29}NaO_3S$
ساختار فرمولی	
وزن مولکولی	348.48 (g/mol)
دانسیته	1.02 (g/cm ³)

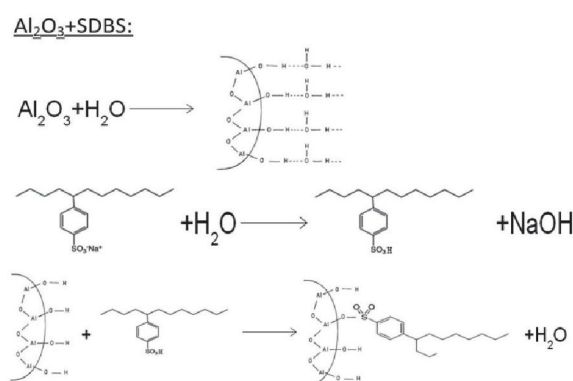
جرم نانوذرات (m_p) و جرم سیال پایه (m_f) با دقت یک‌صدم گرم اندازه‌گیری شد. برای تخمین درصد وزنی از رابطه ۲ می‌توان استفاده نمود [۲۲]:

$$\phi = \left(\frac{m_p}{m_p + m_f} \right) \times 100 \quad (2)$$

اگر چگالی نانوذرات را با ρ_{np} و چگالی سیال پایه را با ρ_{bf} نشان دهیم می‌توان از رابطه ۳ غلظت حجمی نانوذرات در سیال پایه را برآورد نمود [۹]:

$$\% \text{ Volume Concentration } (\phi) = \left[\frac{\frac{W_{np}}{\rho_{np}}}{\frac{W_{np}}{\rho_{np}} + \frac{W_{bf}}{\rho_{bf}}} \right] \times 100 \quad (3)$$

در رابطه ۳ اندیس bf برای سیال پایه و np برای نانوذرات است. شکل ۶ مکانیزم واکنش بین نانوذرات Al_2O_3 و فعال‌کننده سطحی را نمایش می‌دهد.


 شکل ۶ مکانیزم واکنش بین نانوذرات Al_2O_3 و سدیم دودسیل بنزن سولفونات [۲۳]

۲-۲- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

چگالی نانوسیالات را می‌توان بر اساس قانون مخلوط‌ها از رابطه پاک و چو [۲۴] محاسبه کرد:

$$\rho_{eff} = \left(\frac{m}{V} \right)_{eff} = \frac{m_b + m_p}{V_b + V_p} = \frac{\rho_b V_b + \rho_p V_p}{V_b + V_p} = (1 - \phi_p) \rho_b + \phi_b \rho_p \quad (4)$$

در این رابطه ρ_{eff} چگالی نانوسیال، V_b حجم سیال پایه و V_p حجم نانوذرات است. در این رابطه ϕ کسر حجمی ذرات نانو، ρ دانسیته و اندیس p نشان‌دهنده نانوذرات و b نشان‌دهنده سیال پایه می‌باشد. اکثر محققان از رابطه ۵ جهت تعیین ظرفیت گرمایی ویژه استفاده می‌کنند [۲۵]:

$$\begin{aligned}
 (\rho C_p)_{eff} &= \rho_{eff} \left(\frac{Q}{m \Delta T} \right)_{eff} = \rho_{eff} \frac{Q_b + Q_p}{(m_b + m_p) \Delta T} = \rho_{eff} \frac{(m C_p)_b \Delta T + (m C_p)_p \Delta T}{(m_b + m_p) \Delta T} \\
 &= \rho_{eff} \frac{(\rho C_p)_b V_b + (\rho C_p)_p V_p}{\rho_b V_b + \rho_p V_p} = (1 - \phi_p)(\rho C_p)_b + \phi_p(\rho C_p)_p
 \end{aligned} \quad (5)$$

که می‌تواند به صورت رابطه ۶ نوشته شود:

$$C_{p,eff} = \frac{(1 - \phi_p)(\rho C_p)_b + \phi_p(\rho C_p)_p}{(1 - \phi_p)\rho_b + \phi_p\rho_p} \quad (6)$$

که در آن $C_{p,eff}$ گرمای ویژه فشار ثابت نانوسیال، اندیس p برای نانوذرات و اندیس b برای سیال پایه است. مدل‌های تئوری مختلفی برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیالات ارائه شده‌اند که از میان آن‌ها از مدل برینکمن در تحقیق حاضر استفاده شد [۲۶]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (1 - \phi)^{2.5} \quad (7)$$

که در آن ϕ کسر حجمی ذرات نانو، μ_f ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه و μ_{nf} ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال می‌باشد. این رابطه برای ذرات کروی درصد حجمی پایین پیشنهاد می‌شود. پارامترهایی چون حجم نانوذرات، اندازه و شکل آن‌ها، سیال پایه، ضخامت نانو لایه، تکنیک‌های پراکندگی، دما و مقدار pH و حرکت براونی نانوذرات در تعیین ویسکوزیته نانوسیال نقش دارند [۲۷-۳۱]. جدول ۲ خواص ترموفیزیکی سیال‌های پایه و نانوذره Al_2O_3 را نمایش می‌دهد.

جدول ۲ خواص ترموفیزیکی سیال‌های پایه و نانوذره Al_2O_3 [۳۲]

آب	اتیلن گلیکول	Al_2O_3	خاصیت
۴۱۷۹	۲۴۲۰٫۶	۷۶۵	$c_p (J kg^{-1} K^{-1})$
۹۹۷٫۱	۱۱۱۰٫۲	۳۹۷۰	$\rho (kg m^{-3})$
۰٫۶۱۳	۰٫۲۵۳	۴۰	$K (W m^{-1} K^{-1})$
۲۱	۵۷	۰٫۸۵	$\beta \times 10^{-5} (K^{-1})$

برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از رابطه ماکسول-گارتن استفاده شد. این مدل همان مدل اصلاح‌شده ماکسول است و تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد [۳۳]:

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{(K_p + 2K_f) - 2\phi(K_f - K_p)}{(K_p + 2K_f) + \phi(K_f - K_p)} \quad (8)$$

۲-۳- روابط مربوط به انتقال حرارت

دو پارامتر اساسی برای تعیین عملکرد حرارتی یک سیستم، ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت است. ضریب انتقال حرارت جابجایی به صورت رابطه ۹ ارائه می‌شود [۳۴]:

$$h = \frac{q}{A \Delta T_b} \quad (9)$$

که در آن q حرارت دفع شده از سیال در طول مجرای تست، A مساحت دیواره و ΔT_b اختلاف میانگین بین دمای دیواره و مرکز لوله بین ورودی و خروجی (دمای بالک) است.

در رابطه فوق انرژی حرارتی دفع شده از رابطه ۱۰ محاسبه شد:

$$q = \dot{m} C_{p,nf} (T_{in} - T_{out}) \quad (10)$$

و دمای بالک (T_b) به صورت میانگین دمای ورودی و خروجی سیال رادیاتور تعریف گردید:

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (11)$$

در این رابطه T_{in} و T_{out} به ترتیب دماهای سیال در ورودی و خروجی رادیاتور می باشند. بنابراین ضریب جابجایی از رابطه ۱۲ محاسبه می شود:

$$h = \frac{\dot{m} C_{p_{nf}} (T_{in} - T_{out})}{A (T_b - T_w)} \quad (12)$$

در این رابطه T_w دمای دیواره ی لوله است.

برای جریان آرام کاملاً توسعه یافته عدد ناسلت از رابطه کیز محاسبه شد [۳۵]:

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 \left(\frac{D}{L}\right) Re \times Pr}{1 + 0.04 \left[\left(\frac{D}{L}\right) Re \times Pr\right]^{\frac{2}{3}}} \quad (13)$$

عدد پرانتل از رابطه ۱۴ محاسبه گردید:

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} \quad (14)$$

برای محاسبه ی عدد رینولدز جریان نانوسیال می توان از رابطه ۱۵ استفاده کرد:

$$Re = \frac{4 \dot{m}_{nf}}{\pi d_{hy} \mu_{nf}} \quad (15)$$

که در آن $\dot{m}_{nf}$ دبی جرمی نانوسیال و d_{hy} قطر هیدرولیکی مبدل حرارتی است.

استفاده از نانوسیال به عنوان جایگزین سیال خالص باعث افزایش افت فشار در مجاری شده و نیاز به قدرت پمپاژ

بیشتر می باشد. برای بررسی اثر واقعی استفاده از نانوسیال، از پارامتر مریت استفاده شد:

$$Me = \frac{q}{p} \quad (16)$$

در این رابطه p قدرت پمپاژ است که از رابطه ۱۷ محاسبه می شود:

$$p = Q \Delta P \quad (17)$$

۲-۴- معرفی موتور و سیستم خنک کاری موتور M13NI

موتور M13NI مورد استفاده در این آزمایش از نوع چهار سیلندر خطی بوده و دارای حجم موتور ۱۳۲۳ سی سی است. حداکثر قدرت این موتور ۶۲/۵ اسب بخار در دور ۵۵۰۰ و حداکثر گشتاور آن ۱۰۳/۳ نیوتون متر در دور ۲۸۰۰ است. در این موتور از واحد کنترل الکترونیکی (ECU) نوع زیمنس استفاده شده است. این ECU طوری برنامه ریزی شده که در حالت کولر خاموش زمانی که دمای سیال خنک کننده کمتر از ۸۳ درجه سانتی گراد باشد فن خاموش خواهد بود و زمانی که دما به ۹۰ درجه سانتی گراد برسد فن با دور کند شروع به کار می کند و زمانی که دما به ۹۵ درجه سانتی گراد رسید فن با دور تند به کار خود ادامه خواهد داد. این دما توسط یک سنسور از آب عبوری از سرسیلندر (قبل از ترموستات) حس می شود. رادیاتور مورد استفاده دارای ابعاد 41×33 cm بوده و دارای ۳۲ کانال عمودی از جنس آلومینیوم می باشد. حجم سیال در حال گردش ۵ لیتر است. سیال خنک کننده آب خالص، مخلوط آب و اتیلن گلیکول و نانوسیال Al_2O_3 بوده و ترموستات ۸۲ درجه سانتی گراد روی موتور نصب می باشد. فن خنک کننده دارای مشخصات؛ سرعت چرخش ۲۰۰۰ الی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، ولتاژ مصرفی ۱۲ ولت، جریان مصرفی ۱۳ آمپر، توان مصرفی موتور ۲۰۰ وات، قطر خارجی پروانه ۳۱۰ میلی متر است. از دو عدد ترموکوپل نوع T برای اندازه گیری دمای ورودی و خروجی به رادیاتور و از یک عدد دیگر برای اندازه گیری دمای بدنه رادیاتور استفاده شد. با توجه به هدایت حرارتی بالای آلومینیوم و ضخامت کم

لوله‌ها می‌توان دمای بیرون و داخل لوله‌ها را یکسان فرض نمود. کالیبراسیون ترموکوپل‌ها انجام شد و دقت اندازه‌گیری $\pm 1^\circ C$ (0 to $150^\circ C$) برآورد گردید. برای اندازه‌گیری افت فشار سیال درون رادیاتور، از دو عدد فشارسنج 0-60 psi با دقت 0.25 psi استفاده شد. از روماتر شیشه‌ای نوع LZT-2520G با محدوده اندازه‌گیری 7.566-2-20 GPM (75.66 LPM) و دقت اندازه‌گیری $\pm 4\%$ جهت اندازه‌گیری دبی سیال استفاده شد. برای خواندن اطلاعات دقیق دور موتور در هر لحظه از دستگاه عیب‌یاب خودرو استفاده شد. همچنین به‌منظور فعال و غیرفعال کردن فن در دور کند و تند از یک کلید یکسره کن استفاده گردید. تجهیزات و سنسورهای نصب شده بر روی موتور جهت انجام تست در شکل ۷ قابل ملاحظه می‌باشد.



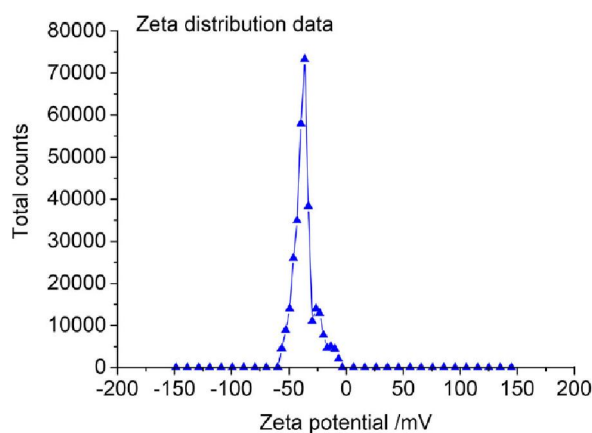
شکل ۷ محل نصب سنسورها بر روی موتور مورد آزمایش

۳- نتایج و بحث

خواص ترموفیزیکی و عملکرد حرارتی نانوذرات Al_2O_3 در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول قبلاً توسط یکی از نویسندگان بررسی و در منبع [۲۳] گزارش شده است.

۳-۱- بررسی ته‌نشینی نانوذرات در سیال پایه به کمک پتانسیل زتا

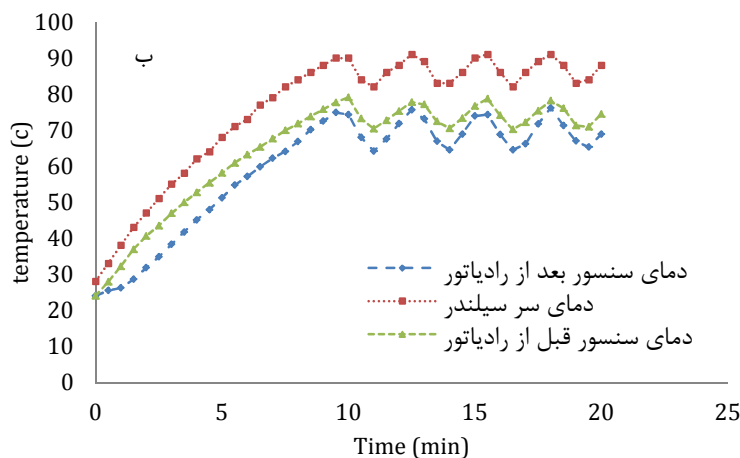
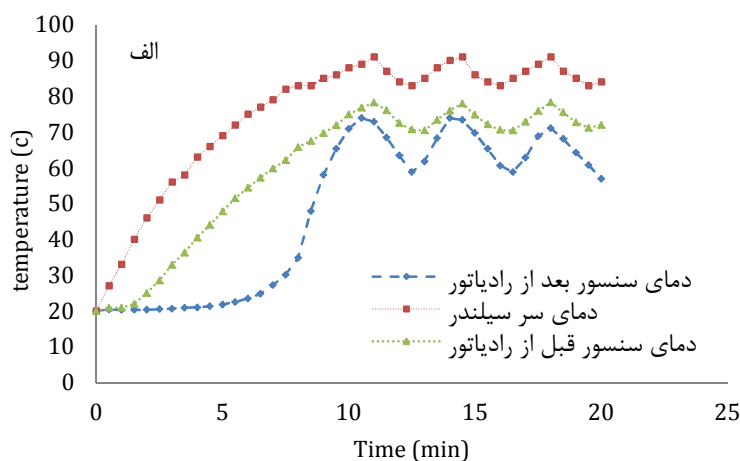
دستگاه آنالیزکننده پتانسیل زتا مدل ZETA-Check ساخت شرکت Particle Metrix کشور آلمان برای اندازه‌گیری پتانسیل زتا استفاده شد. بدین منظور از ۲ درصد وزنی نانوذرات Al_2O_3 با قطر 20 nm استفاده گردید. در این آزمایش دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد، فشار یک اتمسفر و رطوبت ۳۸ درصد بود. بر اساس یک تئوری پایداری، اگر پتانسیل زتا دارای مقدار مطلق بالایی باشد، دافعه الکترواستاتیک بین ذرات افزایش می‌یابد که این منجر به پایداری خوب سوسپانسیون می‌شود. ذراتی که بار سطحی بالایی دارند تمایلی به تشکیل خوشه ندارند. محققان بسیاری از جمله وو و همکاران [۳۶] گزارش کرده‌اند که در پتانسیل زتای بیشتر از 30 mv محلول کلوئیدی پایداری دارند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود بالاترین مقدار اندازه‌گیری‌شده برای نانوسیال $Al_2O_3 + H_2O$ به مقدار 37.7 mv بود که نشان از پایداری و پراکندگی عالی دارد.



شکل ۸ پتانسیل زتا ۲ درصد وزنی نانوسیال Al_2O_3 + water

۳-۲- تغییرات دمای ورودی، خروجی و بدنه رادیاتور

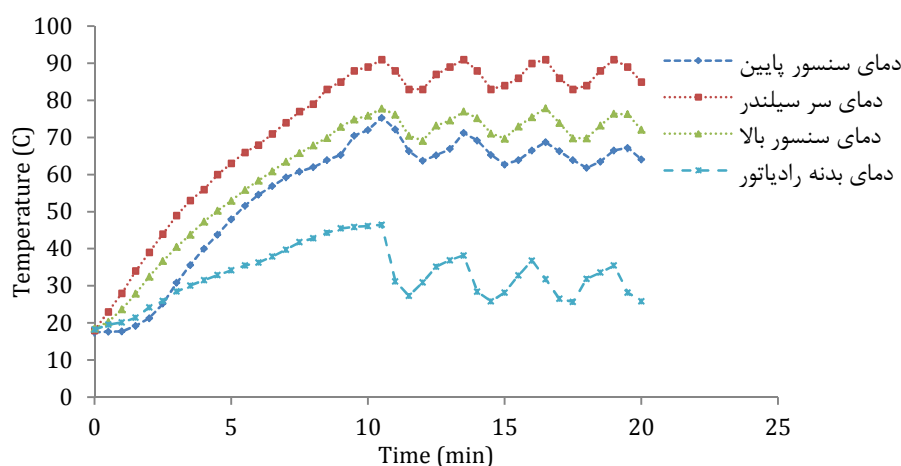
در شکل ۹ نمودار تغییرات دما ورودی، خروجی و دمای بدنه رادیاتور برای آب خالص و آب + اتیلن گلیکول در حالت ترموستات دار و حالت بدون ترموستات نشان داده شده است. آزمایش در دور آرام موتور (۸۳۰ دور در دقیقه) انجام شد، در این حالت دریچه گاز بسته بوده و هوای مورد نیاز موتور از طریق مسیر موتور پلهای تأمین می شود.



شکل ۹ الف) نمودار دماهای سرسیلندر، ورودی و خروجی رادیاتور با آب خالص با ترموستات ۸۲ درجه سانتی گراد، ب) نمودار دماهای سرسیلندر، ورودی و خروجی رادیاتور با آب خالص بدون ترموستات

استفاده از ترموستات بر روی موتور باعث سریع گرم شدن آن می‌شود. در صورتی که موتور سریع‌تر گرم شود، سبب انتشار کمتر ذرات به محیط می‌گردد، زیرا بیشتر آلاینده‌ها در طول گرم شدن موتور پراکنده می‌شوند. در شکل ۹ ب با توجه به اینکه ترموستات بر روی سیستم نصب نمی‌باشد دمای سنسور ورودی و خروجی رادیاتور با یک فاصله مشخصی کاملاً از هم تبعیت می‌کنند. ولی زمانی که بر روی سیستم ترموستات استفاده می‌شود در هنگام بسته بودن ترموستات دمای سنسور بعد از رادیاتور فاصله قابل مشهودی از دمای سنسور قبل از رادیاتور گرفته و زمانی که ترموستات باز می‌شود خیلی سریع دمای آن به دمای سنسور قبل از رادیاتور نزدیک می‌شود و می‌توان گفت تنش حرارتی ایجاد شده در این حالت نسبت به حالتی که بر روی موتور از ترموستات استفاده نشده است بیشتر می‌باشد.

کمترین و بیشترین دمای آب سرسیلندر ۸۲ و ۹۱ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. در شکل ۱۰ مشخص است که بعد از اینکه اولین بار ترموستات باز شد شکل نمودار دمای بدنه رادیاتور از تغییرات ایجاد شده در سنسور دمای سرسیلندر تبعیت می‌کند.



شکل ۱۰ نمودار دماهای سرسیلندر، ورودی، خروجی و بدنه رادیاتور با مخلوط آب و اتیلن گلیکول بدون ترموستات

۳-۳- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی

ضریب انتقال حرارت در دوره‌های مختلف برای آب خالص، مخلوط آب و اتیلن گلیکول (۶۰:۴۰) و در نهایت ترکیب‌های ۱ و ۲ درصد حجمی از نانوسیال در دوره‌های کند و تند فن تست شد. افزایش دور موتور موجب افزایش میزان حرارت موتور و افزایش دمای بالک می‌گردد؛ بنابراین افزایش بیشتر دور موتور باعث کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود. اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌گردد. مثلاً با افزودن ۱ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه در دور تند فن و دور آرام موتور (۸۳۰ دور در دقیقه) شاهد افزایش تقریبی ۱۸ درصد ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به سیال پایه هستیم.

۳-۴- تغییرات عدد ناسلت

تغییرات عدد ناسلت نسبت به رینولدز در دور تند فن و دور کند فن برای آب خالص و نانوسیال $Al_2O_3 + H_2O$ با کسرهای حجمی ۱ و ۲ درصد محاسبه و در شکل ۱۱ گزارش گردید. به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، عدد ناسلت تئوری برای آب خالص توسط روابط تجربی دیتوس-بولتر [۳۷] و گنیلینسکی [۳۸] محاسبه و با مقادیر به دست آمده برای آب خالص در این تحقیق مقایسه و ارزیابی شد.

$$Nu = 0.0236 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (18)$$

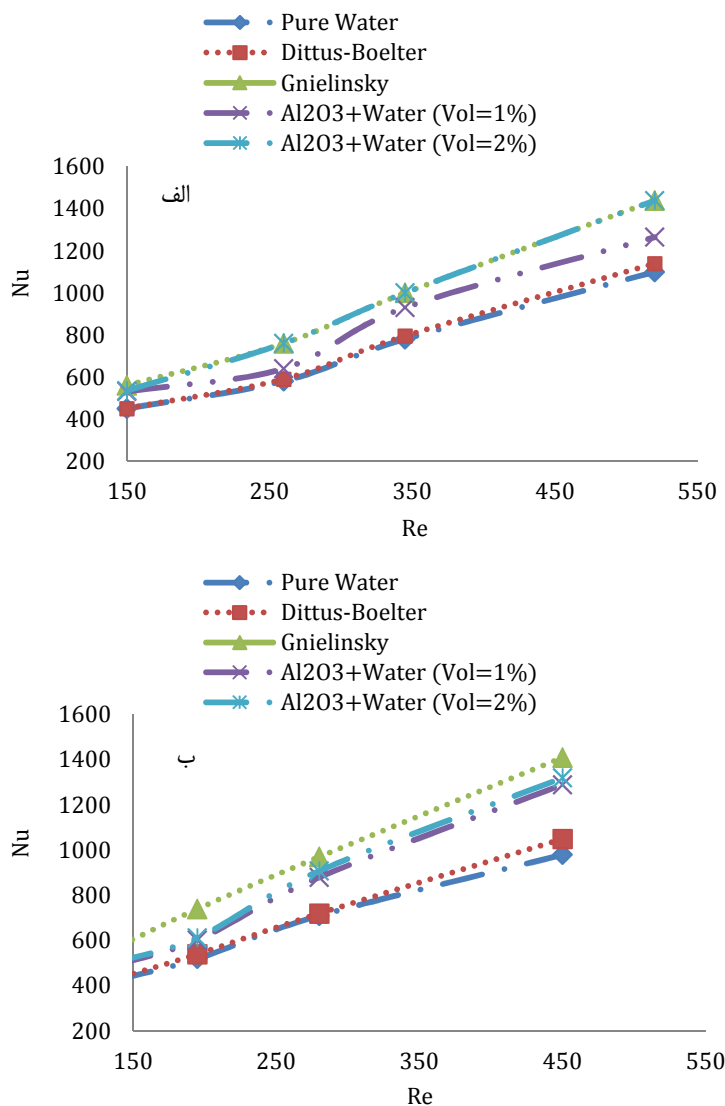
رابطه‌ی دیتوس- بولتر برای $0.6 \leq Pr \leq 160$ و $Re \gg 10000$ معتبر است.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (19)$$

رابطه‌ی گنیلینسکی برای $0.5 \leq Pr \leq 2000$ و $3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$ معتبر است.

مقدار f از رابطه ۲۰ به دست می‌آید:

$$f = (0.79 \ln(Re) - 1.69)^{-2} \quad (20)$$

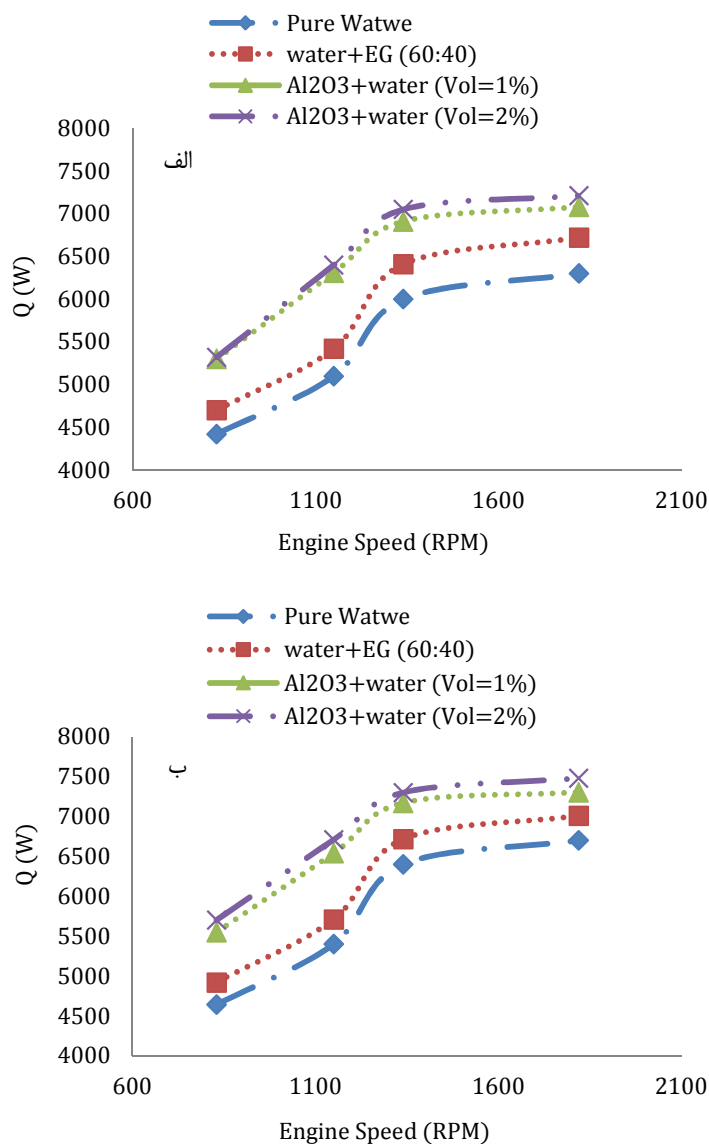


شکل ۱۱ نمودار تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز، الف) دور کند فن، ب) دور تند فن

نتایج نشان داد مقادیر حاصل از رابطه دیتوس- بولتر مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده دارد. رابطه‌ی گنیلینسکی، مقادیر تئوری بیشتری را نسبت به رابطه دیتوس- بولتر پیش‌بینی می‌نماید. 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.

۳-۵- حرارت دفع شده

حرارت دفع شده برای چهار دور مختلف موتور برای حالت آب خالص، آب و اتیلن گلیکول (۶۰:۴۰) و در نهایت با نانوسیال $Al_2O_3 + H_2O$ با کسرهای حجمی ۱ و ۲ درصد در دو حالت دور کند و دور تند فن خنک‌کننده محاسبه و در شکل ۱۲ گزارش گردید.

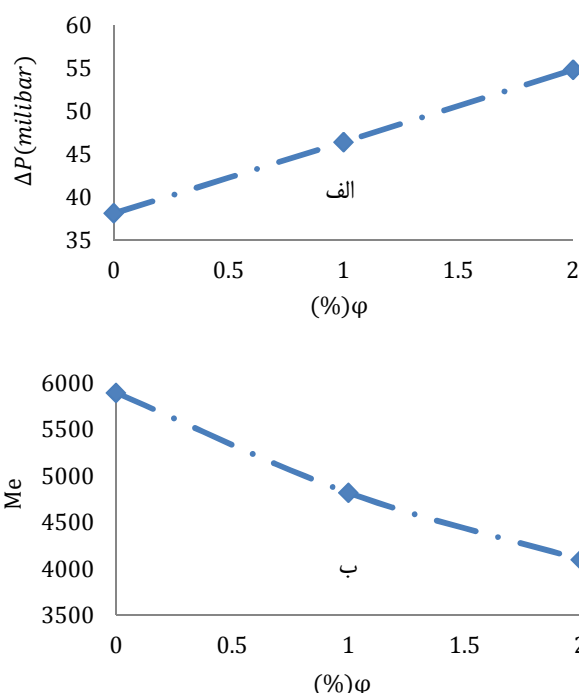


شکل ۱۲ نمودار تغییرات انتقال حرارت دفع شده بر حسب دور موتور، (الف) دور کند فن، (ب) دور تند فن

با افزایش عدد رینولدز جریان که متناظر با افزایش دور موتور است، حرارت دفع شده از رادیاتور افزایش پیدا می‌کند. همچنین، مقدار حرارت دفع شده برای حالت دور تند فن بیشتر از حرارت دفع شده برای حالت دور کند فن می‌باشد. مطابق با شکل ۱۲ برای یک مقدار برابر دور موتور، مقدار حرارت دفع شده از رادیاتور برای نانوسیال بیشتر از آب خالص و مخلوط آب و اتیلن گلیکول بوده و این مقدار با افزایش درصد کسر حجمی نانوذرات افزایش پیدا می‌کند. به‌طور مثال در دور 1150 RPM و وجود ۱ درصد کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه آب به ترتیب افزایش ۷/۲ و ۱۳/۱ درصد نسبت به مخلوط آب + اتیلن گلیکول و آب خالص مشاهده شد.

۳-۶- بررسی افت فشار و پارامتر مریت برای رادیاتور

برای اندازه گیری افت فشار سیال درون رادیاتور، از دو عدد فشارسنج در ورودی و خروجی رادیاتور استفاده گردید. افت فشار و پارامتر مریت در دور 1150 RPM و در حالت دور کند فن خنک کننده اندازه گیری شد. افت فشار رادیاتور با کسر حجمی ۱ و ۲ درصد نسبت به سیال پایه در این دور به ترتیب ۱۷/۱ درصد و ۳۰/۸ درصد محاسبه شد. تغییرات پارامتر مریت در همان دور به ترتیب برای کسرهای حجمی ۱ و ۲ درصد، کاهش ۱۸ درصد و ۳۰/۵ درصد را نسبت به سیال پایه نشان می دهد.



شکل ۱۳ الف) افت فشار رادیاتور، ب) تغییر پارامتر مریت بر حسب درصد نانوذرات

۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر اثر استفاده از نانوسیال $Al_2O_3 + H_2O$ در سیستم خنک کاری موتور M13NI بررسی شد. تست ها در سه حالت آب خالص، آب و اتیلن گلیکول (۶۰:۴۰) و در نهایت با نانوسیال $Al_2O_3 + H_2O$ با کسرهای حجمی ۱ و ۲ درصد در دو دور کند و تند فن خنک کننده انجام گرفت. نتایج نشان داد با اضافه نمودن سورفکتانت SDBS به Al_2O_3 ، نانوسیال تهیه شده در ۲۲ روز اول پایدار است. همچنین مقدار پتانسیل زتا 37.7 mv برآورد شد که نشان از پایداری نانوسیال دارد. کمترین و بیشترین دمای آب سرسیلندر ۸۲ و ۹۱ درجه سانتی گراد به دست آمد. با افزایش دبی جریان، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش یافته و بعدازآن به علت بالا رفتن دور موتور دمای بالک افزایش یافته و باعث کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی می گردد. اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می شود. مشاهده گردید که با افزایش عدد رینولدز جریان که متناظر با افزایش دور موتور می باشد، مقدار ناسلت آزمایشگاهی از مقدار ناسلت تئوری دورتر شده و خطا افزایش می یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز حرارت دفع شده از رادیاتور افزایش پیدا می کند. افزایش کسر حجمی نانوذرات، باعث افزایش انتقال حرارت و افزایش افت فشار و همچنین کاهش پارامتر مریت (نسبت انتقال حرارت به قدرت پمپ) می گردد.

References

- [1] A. Forooghifar, A. Sehat, Thermal analysis of car radiators in the presence of air flow through the radiator, 10th International Conference on Internal Combustion Engines & Oil, (13-15 February 2017), Tehran, Iran. (In Persian)
- [2] B. Rahmatinejad, M. Abbasgholipour, B. Mohammadi Alasti, Redesign of engine radiator based on number of optimal fans using a genetic algorithm, Karafan, 17/4 (2021) 99-118, <https://doi.org/10.48301/KSSA.2021.128398>. (In Persian)
- [3] S.U.S. Choi, J.A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, (12-17 November 1995), San Francisco, United States.
- [4] S.O. Giwa, K.A. Adegoke, M. Sharifpur, J.P. Meyer, Research trends in nanofluid and its applications: a bibliometric analysis, Journal of Nanoparticle Research, 24/3 (2022) 1-22, <https://doi.org/10.1007/s11051-022-05453-z>.
- [5] M. Rezazadeh, H. Arkavazi, Numerical simulation of heat transfer inside a car radiator using nanofluid, The first competition of the Comprehensive International Conference on Engineering Sciences in Iran, (8 September 2016), Bandar Anzali, Iran. (In Persian)
- [6] A. Yaghoobi, H. Pourmirzaagha, J. Rezapour, M. Haghdadi, Experimental study of total heat transfer in car radiators using aluminum oxide nanofluid, 8th Chiller and Cooling Tower Heat Converters Conference, (22 December 2016), Tehran, Iran. (In Persian)
- [7] T. Ganesan, P. Seeni Kannan, Heat-transfer enhancement of nanofluids in a car radiator, Materials and technology, 52/4 (2018) 507-512, <https://doi.org/10.17222/mit.2017.171>.
- [8] H. Xie, Y. Li, W. Yu, Intriguingly high convective heat transfer enhancement of nanofluid coolants in laminar flows, Physics Letters A, 374/25 (2010) 2566-2568, <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2010.04.026>.
- [9] K.Y. Leong, R. Saidur, S.N. Kazi, A.H. Mamun, Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator), Applied Thermal Engineering, 30/17-18 (2010) 2685-2692, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.07.019>.
- [10] S.M. Peyghambarzadeh, S.H. Hashemabadi, S.M. Hoseini, M. Seifi Jamnani, Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators, International Communications in Heat and Mass Transfer, 38/9 (2011) 1283-1290, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.001>.
- [11] S.M. Peyghambarzadeh, S.H. Hashemabadi, M. Naraki, Y. Vermahmoudi, Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator, Applied Thermal Engineering, 52/1 (2013) 8-16, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.013>.
- [12] M. Naraki, S.M. Peyghambarzadeh, S.H. Hashemabadi, Y. Vermahmoudi, Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator, International Journal of Thermal Sciences, 66 (2013) 82-90, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.11.013>.
- [13] A.M. Hussein, R.A. Bakar, K. Kadirgama, K.V. Sharma, Heat transfer enhancement using nanofluids in an automotive cooling system, International Communications in Heat and Mass Transfer, 53 (2014) 195-202, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.003>.
- [14] H.M. Ali, H. Ali, H. Liaquat, H.T.B. Maqsood, M.A. Nadir, Experimental investigation of convective heat transfer augmentation for car radiator using ZnO-water nanofluids, Energy, 84 (2015) 317-324, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.103>.
- [15] M. Raja, R. Vijayan, P. Dineshkumar, M. Venkatesan, Review on nanofluids characterization, heat transfer characteristics and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 64 (2016) 163-173, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.079>.
- [16] M.B. Bigdeli, M. Fasano, A. Cardellini, E. Chiavazzo, P. Asinari, A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60 (2016) 1615-1633, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.027>.

- [17] J. Heydarbeigi, Investigation of the effect of using copper nanofluid, silver nanofluid and aluminum oxide on the heat transfer rate of Ferguson 285 copper tractor engine radiator, 1st International Conference on Applied Research in Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment, (16 July 2017), Hamedan, Iran. (In Persian)
- [18] B. Rahmatinejad, M. Abbasgholipour, B. Mohammadi Alasti, Experimental Evaluation of Heat Transfer of MF 285 Tractor Radiator, using Nano-fluid Al_2O_3 +Water, Journal of Agricultural Machinery, 12/3 (2022) 281-299, <https://doi.org/10.22067/jam.2020.58870.0>. (In Persian)
- [19] H. Ghasemi Zavaragh, Optimization of the cooling system of a gasoline internal combustion engine to reduce fuel consumption and exhaust emissions, Karafan, 19/1 (2022) 291-309, <https://doi.org/10.48301/KSSA.2021.284665.1580>. (In Persian)
- [20] N.V. Suramwar, S.R. Thakare, N.T. Khaty, Synthesis and catalytic properties of nano CuO prepared by soft chemical method, International Journal of Nano Dimension, 3/1 (2012) 75-80, <https://doi.org/10.7508/IJND.2012.01.009>.
- [21] K. Kannaki, P.S. Ramesh, D. Geetha, Hydrothermal synthesis of CuO nanostructure and their characterizations, International Journal of Scientific & Engineering Research, 3/9 (2012) 1-4.
- [22] S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel, Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, ASME Journal of Heat and Mass Transfer, 125/4 (2003) 567-574, <https://doi.org/10.1115/1.1571080>.
- [23] B. Rahmatinejad, M. Abbasgholipour, B. Mohammadi Alasti, Investigating thermo-physical properties and thermal performance of Al_2O_3 and CuO nanoparticles in Water and Ethylene Glycol based fluids, International Journal of Nano Dimension, 12/3 (2021) 252-271, <https://doi.org/10.22034/IJND.2021.681560>.
- [24] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Experimental Heat Transfer, 11/2 (1998) 151-170, <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>.
- [25] C.J. Ho, W.K. Liu, Y.S. Chang, C.C. Lin, Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study, International Journal of Thermal Sciences, 49/8 (2010) 1345-1353, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.02.013>.
- [26] H.C. Brinkman, The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions, The Journal of Chemical Physics, 20/4 (1952), <https://doi.org/10.1063/1.1700493>.
- [27] A. Turgut, I. Tavman, M. Chirtoc, H.P. Schuchmann, C. Sauter, S. Tavman, Thermal Conductivity and Viscosity Measurements of Water-Based TiO_2 Nanofluids, International Journal of Thermophysics, 30/4 (2009) 1213-1226, <https://doi.org/10.1007/s10765-009-0594-2>.
- [28] M. Bahiraei, S.M. Hosseinalipour, K. Zabihi, E. Taheran, Using neural network for determination of viscosity in water- TiO_2 nanofluid, Advances in Mechanical Engineering, 4 (2012), <https://doi.org/10.1155/2012/742680>.
- [29] X. Fan, H. Chen, Y. Ding, P.K. Plucinski, A.A. Lapkin, Potential of 'nanofluids' to further intensify microreactors, Green Chemistry, 10/6 (2008) 670-677, <https://doi.org/10.1039/B717943J>.
- [30] A. Ghadimi, I.H. Metselaar, The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid, Experimental Thermal and Fluid Science, 51 (2013) 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.06.001>.
- [31] T. Yiamsawas, A.S. Dalkilic, O. Mahian, S. Wongwises, Measurement and Correlation of the Viscosity of Water-Based Al_2O_3 and TiO_2 Nanofluids in High Temperatures and Comparisons with Literature Reports, Journal of Dispersion Science and Technology, 34/12 (2013) 1697-1703, <https://doi.org/10.1080/01932691.2013.764483>.
- [32] D. Wen, G. Lin, S. Vafaei, K. Zhang, Review of nanofluids for heat transfer applications, Particuology, 7/2 (2009) 141-150, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.01.007>.
- [33] J.C. Maxwell Garnett, Colours in metal glasses and in metallic films, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 203/359-371 (1904) 385-420, <https://doi.org/10.1098/rsta.1904.0024>.
- [34] W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, Y.I. Cho, Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill Education, (1998), ISBN: 9780070535558, 0070535558
- [35] W.M. Kays, Numerical Solutions for Laminar-Flow Heat Transfer in Circular Tubes, Transactions of the ASME, 77/8 (1955) 1265-1272, <https://doi.org/10.1115/1.4014661>.

- [36] S. Wu, D. Zhu, X. Li, H. Li, J. Lei, Thermal energy storage behavior of Al_2O_3 -H₂O nanofluids, *Thermochimica Acta*, 483/1-2 (2009) 73-77, <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.11.006>.
- [37] F.W. Dittus, L.M.K. Boelter, Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 12/1 (1985) 3-22, [https://doi.org/10.1016/0735-1933\(85\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0735-1933(85)90003-X).
- [38] V. Gnielinski, Neue Gleichungen für den Wärme-und den Stoffübergang in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen, *Forschung im Ingenieurwesen A*, 41 (1975) 8-16, <https://doi.org/10.1007/BF02559682>.