

بررسی تجربی رفتار انتقال گرمای همرفتی و ولتاژ شکست عایقی AC نانوروغن ترانسفورماتور با ذرات Fe_3O_4

جلال قاسمی*
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
میثم نظری
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

در مقاله حاضر مطالعه تجربی رفتار انتقال گرمای همرفتی و ولتاژ شکست عایقی متناوب، AC نانوروغن جهت استفاده در ترانسفورماتورهای برق مدنظر می‌باشد. نانوروغن مورد مطالعه حاوی نانوذرات کلونیدی مغناطیسی اکسید آهن با سیال پایه روغن ترانسفورماتور از نوع نیترو لیبرا است که این نوع روغن از روغنهای متعارف مورد استفاده در ترانسفورماتورها میباشد. آزمایشهای تجربی انتقال حرارت همرفتی با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده صورت گرفته و این آزمایشها در رژیم جریان آرام و تحت شار حرارتی اعمالی ثابت روی دیواره انجام پذیرفته است. همچنین آزمایش ولتاژ شکست متناوب با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ولتاژ شکست BA100 و براساس استاندارد IEC 60156 انجام گرفته است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد نانوروغن تهیه شده با نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن با اندازه متوسط ۲۳ نانومتر و با غلظت حجمی ۰/۱ درصد دارای ضریب انتقال گرمای همرفتی متوسط به میزان ۴/۵ درصد بیشتر از روغن پایه می‌باشد. همچنین ولتاژ شکست عایقی متناوب این نانوروغن با غلظت حجمی ۰/۱ درصد، به میزان ۲۳/۸ درصد نسبت به روغن پایه بهبود یافته است. داده‌های حاصل از آزمایش تحلیل انتقال حرارت همرفتی با روابط تجربی دیگر محققان مقایسه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: ترانسفورماتور، انتقال گرمای همرفتی، نانوروغن، نانوذرات، ولتاژ شکست عایقی.

Experimental Analysis of Convective Heat Transfer Behavior and AC Dielectric Breakdown Voltage of Transformer Oil Including Fe_3O_4 Nanoparticles

J. Ghasemi

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

M. Nazari

M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran

Abstract

Experimental study of convective heat transfer behavior and the AC dielectric breakdown voltage of nano oil for use in transformers is the main scope of this work. The nano oil containing colloidal magnetic Fe_3O_4 nanoparticles at different volume concentration and the Nytro Libra oil that is the conventional oil in power transformers has been considered as the base fluid. The convective heat transfer behavior was studied by using an experimental setup in laminar flow regime and under constant heat flux. The AC dielectric breakdown voltage by using BA100 portable dielectric oil tester according to IEC 60156 was carried out. Results show that nano oil with 23 nanometer size and volume concentration of 0.1% has convective heat transfer coefficient to 4.5% higher than the base oil. The AC dielectric breakdown voltage improved 23.8% for nano oil with volume concentration of 0.1% compared to the base oil. The results of the convective heat transfer coefficient behavior of nano oil were compared with other researchers.

Keywords: Transformer Oil, Convective Heat Transfer, Nano Oil, Nanoparticles, Dielectric breakdown voltage.

۱- مقدمه

روغن در ترانسفورماتور بعنوان سیال خنک‌کننده و عایق الکتریکی بکار می‌رود و بهبود مشخصه‌های انتقال گرمایی ضمن حفظ و یا افزایش استقامت عایقی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. چرا که با بهبود جزئی در هر دو و یا هر یک از موارد فوق افزایش بهره‌برداری از ظرفیت ترانسفورماتور، افزایش طول عمر و کاهش هزینه‌های ساخت قابل توجهی را به دنبال خواهد داشت. در این راستا، ایده استفاده از نانوذرات در روغن ترانسفورماتور بدلیل قرارگیری آن در یک چرخه خنک‌کاری مورد توجه محققان در صنعت ترانسفورماتورسازی است. از آنجائیکه تحقیقات زیادی در زمینه جریان و انتقال گرما نانوسیالات و نانوروغن صنعتی صورت گرفته ولی به دلیل محدودیتهای زیاد استفاده از نانوذرات در روغن ترانسفورماتور نظیر عملکرد دی الکتریکی آن، اکسیداسیون، تاثیر آن روی پیروی مواد عایقی، روسوب‌گذاری و ایجاد لجن، تحقیقات خاص دقیقتری را برای استفاده از نانوروغن در ترانسفورماتورها ایجاب می‌نماید. با توجه به اهمیت موضوع از دیدگاه علمی و اقتصادی تحقیقاتی در کشورهای مختلف در این زمینه صورت گرفته است ولی گزارشهای محدودی در دسترس می‌باشد. از طرفی کشور ایران قطب صنعت ترانسفورماتورسازی در خاورمیانه می‌باشد لذا لزوم دستیابی به تکنولوژی پایه‌ای تولید نانوروغن و توسعه و تجهیز دستگاههای آزمایشگاهی برای آزمایشهای مختلف حرارتی و الکتریکی و در نتیجه بومی‌سازی آن، وجود داشته و مقاله حاضر نیز در این راستا می‌باشد.

چوی و همکاران [۱] با افزودن نانوذرات آلومینا و آلومینیوم نیتريد درون روغن ترانسفورماتور با غلظت حجمی ۰/۵٪ به افزایش ۸٪ در رسانایی گرمایی روغن و افزایش ۲۰٪ در ضریب انتقال گرمای کلی رسیدند. ژوان و لی [۲] با افزودن نانوذرات مس با غلظت ۷/۵٪ و اندازه ذرات ۱۰۰ نانومتر به افزایش ۴۵٪ در رسانایی گرمایی روغن ترانسفورماتور رسیدند. سعیدی نیا و همکاران [۳]، خواص ترموفیزیکی و رئولوژیکی نانوسیال روغن پایه و اکسید مس را درون لوله افقی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد با افزودن نانوذرات درون روغن، رسانایی گرمایی افزایش یافته و برای غلظت‌های زیر ۲٪ نانوروغن رفتار نیوتنی دارد. افزایش ۱۲/۷٪ ضریب انتقال گرما در غلظت حجمی ۲٪ در اعداد رینولدز بالا از دیگر نتایج این پژوهش بود. با توجه به حساس بودن عملکرد روغن ترانسفورماتور به پارامترهای مختلف، اثر افزودن نانوذرات در تغییر مشخصه‌های روغن ترانسفورماتور باید مورد بررسی قرار گیرد. بهشتی و همکاران [۴] تاثیر افزودن نانولوله‌های کربن را درون روغن ترانسفورماتور برای غلظت‌های حجمی زیر ۰/۱٪ را بررسی کردند. بررسی تغییرات مشخصه‌هایی مانند ولتاژ شکست، نقطه اشتعال، نقطه

ریزش، چگالی، رسانایی الکتریکی، لزجت و تنش برشی نیز مورد بررسی قرار گرفته و رسانایی گرمایی تنها مشخصه انتقال حرارتی این پژوهش می‌باشد که آزمایش شده است. سگال و همکاران [۵] با افزودن نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن درون روغن ترانسفورماتور مشاهده نمودند که ولتاژ شکست عایقی متناوب نانوروغن و روغن پایه تفاوت چندانی ندارد. سارتوراتو و همکاران [۶] استقامت عایقی نانوسیال مغناطیسی با سیال پایه روغن ترانسفورماتور را در غلظت‌های ۰/۰۴ تا ۰/۸ درصد حجمی آزمایش نموده و تا ۱۵ درصد بهبود ولتاژ شکست را تجربه نمودند. دو و همکاران [۷] از نانوذرات اکسید تیتانیوم با قطر متوسط ۲۰ نانومتر در روغن ترانسفورماتور استفاده کردند. افزایش ۵۳٪ در ولتاژ شکست متناوب نانو روغن در مقایسه با روغن پایه از نتایج این پژوهش است. لی و همکاران [۸] در بررسی تاثیر افزودن نانوذرات مغناطیسی روی ولتاژ شکست روغن به این نتیجه رسیدند که در صورتی که به روغن در حال تست ولتاژ شکست میدان مغناطیسی اعمال شود، ولتاژ شکست ۳۰٪ نسبت به حالت عدم وجود میدان افزایش می‌یابد. در این پژوهش به جنبه‌های انتقال گرما پرداخته نشده است. چيسا و ساريت [۹] به بررسی تجربی تاثیر افزودنی نانوذرات بر روی ضریب رسانایی گرمایی و زمان شکست دی الکتریک پرداخته‌اند. در این مطالعه از نانوذرات SiC با میانگین اندازه کمتر از ۸۰ نانومتر، Al₂O₃ با میانگین اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر، SiO₂ با میانگین اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر استفاده گردیده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رسانایی گرمایی روغن ترانسفورماتور حاوی ۱٪ حجمی از نانوذرات SiC، Al₂O₃ و SiO₂ به ترتیب ۱/۱، ۱/۰۸ و ۱/۰۳ مرتبه بیشتر از روغن ترانسفورماتور خالص است. همچنین زمان شکست دی الکتریک با اضافه شدن ذرات SiC، Al₂O₃ و SiO₂ به روغن ترانسفورماتور در همه غلظت‌ها کاهش یافته ولی مقدار آن برای Fe₂O₃ در همه غلظت‌ها افزایش می‌یابد و خاصیت عایقی تقویت می‌گردد.

در تحقیقات مرور شده و قابل دسترس عملکرد الکتریکی نانوروغن مورد استفاده در ترانسفورماتور برای انواع نانوذرات به شکل پودری صورت گرفته و نتایج همسویی هم ارائه نشده است. از طرفی بررسی رفتار انتقال گرما، محدود به تاثیر نانوذرات مورد استفاده در رسانایی نانوروغن بوده و با توجه به ماهیت انتقال گرمای همرفتی روغن به عنوان سیال خنک‌کن در ترانسفورماتور در کنار رفتار الکتریکی آن مطالعه دقیق تئوری و آزمایشگاهی امری ضروری می‌باشد که از اهداف پژوهش حاضر است. از اهداف اصلی دیگر این مقاله علاوه بر بومی‌سازی، مطالعه تاثیر نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن به شکل کلونیدی بر انتقال گرمای همرفتی نانوروغن حاصل از آن

یکسان در لوله قسمت اصلی آزمایش قرار داده شد تا دمای نقاط مختلف را اندازه‌گیری نماید. داده‌های این ترموکوپلها هر ۱۰ ثانیه توسط دستگاه ثبت داده‌ها جمع‌آوری و ثبت می‌گردد. جریان پس از گذشتن از قسمت اصلی آزمایش وارد بالابرنده شده تا نوسانات آن گرفته شود. دبی با استفاده از میزان سیال جمع شده در یک ظرف مدرج در طی یک بازه زمانی مشخص محاسبه می‌شود. نانوروغن گرم شده پس از عبور از مبدل خنک‌کن پوسته لوله‌ای سرد شده و به شرایط ابتدایی رسانده می‌شود. برای تهیه نمونه‌های مورد آزمایش، از نانوذرات کلئیدی مغناطیسی خریداری شده از شرکت فروتک^۱ با نام تجاری ای اف اچ-۱^۲ استفاده گردیده است. این محصول شامل ۵٪ نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن با اندازه متوسط ۲۳ نانومتر، ۱۵٪ پایدارساز و ۸۰٪ سیال پایه آلی (هیدروکربن سبک) می‌باشد لذا برای به دست آوردن غلظت حجمی نانوروغن تهیه شده از آن از رابطه (۱) استفاده می‌گردد [۸]:

$$\varphi = \left(\frac{V_{cn} * 0.05}{V_O + V_{cn}} \right) \quad (1)$$

مطابق با این رابطه با افزودن ۸ سی سی از محلول نانوذرات مغناطیسی درون ۴۰۰ میلی لیتر از روغن پایه ترانسفورماتور نیترو لیبر^۳ و استفاده از دستگاه اولتراسونیک بندلین سونوپالس^۴ (اچ دی ۲۲۰۰) به مدت ۲۰ دقیقه نانو روغن با غلظت ۰.۱٪ به دست می‌آید. جدول ۱ خواص ترموفیزیکی روغن ترانسفورماتور و نانوذرات کلئیدی مغناطیسی را نشان می‌دهد [۹،۱۰].

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی روغن و نانوسیال مغناطیسی [۹،۱۰]

ماده	چگالی (kgm ⁻³)	رسانایی گرمایی (wm ⁻¹ K ⁻¹) ^(۱)	گرمای ویژه (kgkg ⁻¹)	لزجت دینامیک (kgm ⁻¹ s ⁻¹)
روغن ترانسفورماتور	۸۸۰	۰,۱۲۶	۱۸۶۰	۱۳,۷
نانوذرات کلئیدی مغناطیسی	۱۱۷۲	۰,۱۷۵	۱۸۱۰	۶

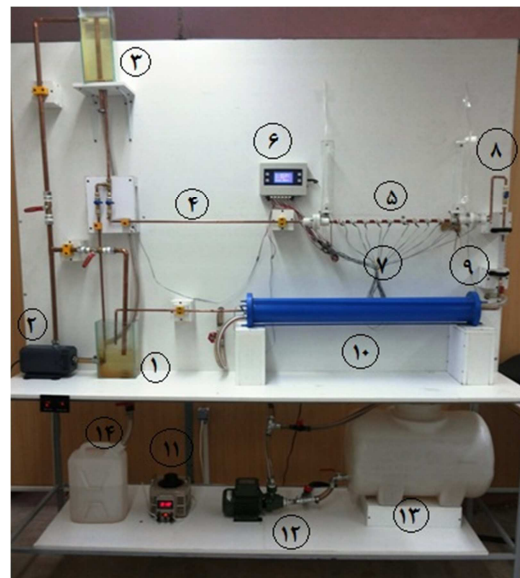
۳- تست ولتاژ شکست عایقی روغن

یکی از پارامترهای مهم الکتریکی روغن در ترانسفورماتور، ولتاژ شکست آن می‌باشد. ولتاژ شکست ولتاژی است که روغن قادر به مقاومت در برابر اختلاف ولتاژ اعمالی به آن نبوده و

و همچنین عملکرد خاصیت عایقی الکتریکی آن به صورت تجربی می‌باشد.

۲- دستگاه ساخته شده آزمایشگاهی و تهیه نانوروغن

برای انجام آزمایش‌های مربوط به رفتار انتقال گرما همرفتی، دستگاه آزمایشگاهی مطابق شکل ۱ در آزمایشگاه تحقیقاتی نانوسیالات دانشگاه زنجان ساخته شد. این دستگاه شامل پمپ، قسمت اصلی آزمایش، مبدل خنک کننده، بالابرنده، مخزن اولیه و ثانویه می‌باشد.



۱- مخزن اصلی روغن ۲- پمپ روغن ۳- مخزن تثبیت فشار روغن ۴- بخش بدون گرمایش جهت توسعه یافتگی هیدرودینامیکی ۵- قسمت اصلی آزمایش (بدون عایق- بندی حرارتی) ۶- دستگاه ثبت داده‌ها ۷- حسگرهای دما ۸- رایزر ۹- دبی سنچ حجمی ۱۰- مبدل خنک کن ۱۱- منبع تغذیه الکتریکی ۱۲- پمپ چرخشی آب خنک‌کن ۱۳- مخزن آب خنک‌کن ۱۴- سیستم تخلیه روغن

شکل ۱- دستگاه تحلیل انتقال گرما همرفت

یک شیرکنار گذر در خروجی پمپ نصب گردیده تا جریان بخش آزمایش تحت کنترل قرار گیرد. به منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان و از بین بردن اثرات ورودی، بخشی با عنوان قسمت ورودی در نظر گرفته شده است. قسمت اصلی آزمایش شامل یک لوله مسی با قطر داخلی ۷ میلی متر و قطر خارجی ۹/۴۶ میلی متر و طول نیم متر می‌باشد. سیم نیکل-کروم به دور لوله پیچیده شده و عایق حرارتی برای جلوگیری از هدر رفت گرما استفاده شده است (به منظور نمایش بهتر جزئیات، عایق حرارتی که در زمان آزمایش نصب می‌شود برداشته شده است). دو سر سیم نیکل-کروم به یک منبع تغذیه متناوب قابل تنظیم متصل می‌شود؛ بنابراین شار گرمایی اعمالی می‌تواند متغیر باشد. ده عدد ترموکوپل SMT-160 در فواصل

¹ Ferro tech

² EFH-1

³ Nytro Libra

⁴ BandelinSonoPuls (HD 2200)

درصد غلظت حجمی نانوذرات ندارد [۱۱]. با بررسی چندین مدل ارائه شده برای روغن ترانسفورماتور با نانوذرات مختلف برای گستره دمایی مورد آزمایش در این مقاله و با توجه به اطلاعات قابل دسترس و دقت مورد نظر، رابطه (۲) برای محاسبه لزجت دینامیکی نانوروغن استفاده شده است [۱۲].

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

همچنین رسانایی گرمایی آن با استفاده از تئوری ماکسول از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$k_{nf} = k_f \left(\frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} \right) \quad (3)$$

سایر مشخصات جریان و انتقال گرما به ترتیب از روابط (۴) تا (۶) در دمای حجمی سیال محاسبه می‌گردد.

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_p \quad (4)$$

$$Pr_{nf} = \frac{\mu_{nf} \cdot C_{p,nf}}{k_{nf}} \quad (5)$$

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} \cdot v \cdot d}{\mu_{nf}} \quad (6)$$

با توجه به اعمال شرط مرزی گرمایی شار گرمایی ثابت، q در دستگاه ساخته شده، ضریب انتقال گرمای همرفتی محلی، $h(x)$ از رابطه (۷) تعیین می‌گردد:

$$h(x) = \frac{q''}{T_w(x) - T_f(x)} \quad (7)$$

در رابطه x فاصله محوری از ورودی قسمت اصلی آزمایش می‌باشد. طبق اصل بقای انرژی توزیع دمای حجمی سیال در طول لوله از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$T_f(x) = T_{in} + \frac{q'' \cdot P \cdot x}{\rho \cdot c_p \cdot v \cdot A} \quad (8)$$

با محاسبه دمای متوسط دیواره، \bar{T}_w از مقادیر اندازه‌گیری شده و دمای میانگین دمای حجمی سیال، \bar{T}_f بین نقاط نصب ترموکوپلها از رابطه (۸)، ضریب انتقال گرمای همرفت متوسط مطابق رابطه (۹) قابل محاسبه است.

$$\bar{h} = \frac{q''}{(\bar{T}_w - \bar{T}_f)} \quad (9)$$

۵- نتایج و بحث

۵-۱- صحت سنجی داده‌ها

به منظور بررسی دقت دستگاه تجربی، ضریب انتقال گرمای همرفت حاصل از داده‌های آزمایش با نتایج ارائه شده مطابق رابطه (۱۰) در مراجع [۱۶، ۱۷] مقایسه گردیده است. این مقایسه برای روغن پایه در $Re=75$ و شرایط مرزی یکسان صورت گرفته است.

جریان برق از آن عبور کرده و قوس الکتریکی تشکیل می‌گردد. مکانیزم اصلی در وقوع پدیده شکست عایقی، یونیزاسیون مولکولی روغن در اثر میدان الکتریکی می‌باشد که باعث گسترش استریمرها^۱ درون روغن خواهد شد. استریمرها، ساختارهای گازی شکل پیش رونده با چگالی پایین هستند که در نقاطی از روغن که میدان الکتریکی قوی می‌باشد تشکیل می‌شوند. با یونیزه شدن روغن به یون‌های مثبت کند و الکترون‌های سریع، ناحیه‌ای با بار مثبت به سرعت شروع به گسترش می‌کند زیرا الکترون‌ها سریعاً به سمت قطب مثبت کشیده می‌شوند. نتیجه این فعل و انفعالات الکتروپدینامیکی، توزیع ناهمگون میدان الکتریکی در ناحیه بین دو الکتروود می‌باشد که در قسمت‌هایی که قدرت میدان بسیار بالاست منجر به افزایش دمای روغن و تبخیر آن شده و استریمرها را بوجود می‌آورد. گسترش استریمرها مکانیزم اصلی وقوع پدیده شکست عایقی می‌باشد.

در این مطالعه برای هر کدام از نمونه‌ها، ابتدا ولتاژ شکست متناوب براساس استاندارد IEC 60156 با استفاده از دستگاه آنالیز شکست BA100 محصول شرکت "های ولتاژ"^۲ که در شکل ۲ نشان داده شده است، انجام گردید. مطابق این استاندارد ولتاژ با نرخ افزایشی ۲ کیلوولت بر ثانیه تا وقوع شکست عایقی به روغن اعمال شده و این عمل ۶ بار تکرار گشته و میانگین آنها بعنوان ولتاژ شکست متناوب روغن تعیین می‌گردد.



شکل ۲- دستگاه تست ولتاژ شکست عایقی روغن

۴- مبانی تئوری نانوروغن و معادلات حاکم

پژوهش‌های متعددی برای تعیین خواص مورد نیاز مربوط به جریان و انتقال گرمای نانوسیالات و از آن جمله برای لزجت دینامیکی آنها ارائه شده است [۱۵-۱۱]. نتایج تجربی نشان داده است که برای نانوسیال با سیال پایه روغن ترانسفورماتور در دمای بالای ۴۰ درجه سلسیوس لزجت آن وابستگی زیادی به

¹ Streamers

² HIGH VOLTAGE technology

نتایج حاکی از آن است که نانوروغن با غلظت حجمی ۰/۱٪ دارای ضریب انتقال گرمای بهتری نسبت به روغن پایه دارد. با انجام محاسبات ریاضی بر اساس معادله (۱۰)، ضریب انتقال گرمای همرفت متوسط نیز تعیین و با نتایج تجربی که در دمای متوسط دیواره و دمای متوسط حجمی سیال طبق رابطه (۹) به دست آمده است، مقایسه گردید. جدول ۲ نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود در غلظت حجمی ۰/۱٪ ضریب انتقال گرمای متوسط نانوروغن ۴/۵٪ نسبت به روغن پایه افزایش یافته است.

جدول ۲- ضریب انتقال گرمای متوسط از نتایج آزمایش و

معادله (۱۰)

نمونه	روغن پایه	نانوروغن ۰/۱٪
ضریب انتقال گرمای از نتایج آزمایش	۸۰/۲	۸۳/۸
ضریب انتقال گرمای بر اساس معادله (۱۰)	۹۱/۱	۹۷/۲
انحراف (%)	۱۱/۹	۱۳/۸
بهبود نسبت به روغن پایه (%)	-	۴/۵

جدول ۳- ولتاژ شکست نمونه‌های نانوروغن و روغن پایه

نمونه	روغن پایه	نانوروغن ۰/۱٪
ولتاژ شکست عایقی (کیلو ولت)	۳۹/۱	۴۸/۴

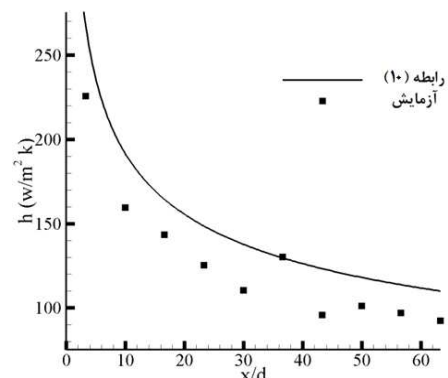
۳-۵- ولتاژ شکست عایقی الکتریکی

آزمایش‌های تجربی استقامت شکست عایقی الکتریکی نمونه‌های مختلف نانوروغن براساس استاندارد IEC60156 انجام گرفته و نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. این نتایج حاکی از بهبود قابل ملاحظه در مقاومت شکست عایقی الکتریکی روغن با افزودن نانوذره مغناطیسی به آن می‌باشد. این مقدار بهبود برای نانوروغن با غلظت حجمی ۰/۱٪ به میزان ۲۳/۸٪ است. افزایش مقاومت عایقی را می‌توان به این دلیل دانست که نانوذرات مغناطیسی با به دام انداختن و جذب الکترون‌های آزاد، سرعت گسترش استریمرها را کاهش داده و شکست را به تاخیر می‌اندازند. وقتی که روغن در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، استریمرها در فاصله بین دو الکترود شروع به گسترش می‌کنند تا به الکترود مقابل برسند و شکست اتفاق بیفتد. در واقع، زمانیکه بین الکترودهای غوطه‌ور در نانوروغن ولتاژ اعمال می‌شود، نانوذرات با به دام انداختن الکترون‌های آزاد باردار شده و شروع به حرکت می‌کنند و با توجه به اینکه گرادیان

$$h = \begin{cases} \frac{k}{d}(3.303x^{*-\frac{1}{8}} - 1.00)x^{*} \leq 0.00005 \\ \frac{k}{d}(1.302x^{*-\frac{1}{8}} - 0.50) \quad 0.00005 < x^{*} \leq 0.0015 \\ \frac{k}{d}(4.364 + 8.68(10^3x^{*})^{-0.506}e^{-41x^{*}})x^{*} > 0.001 \end{cases} \quad (10)$$

$$x^{*} = \frac{x}{d \cdot Re \cdot Pr}$$

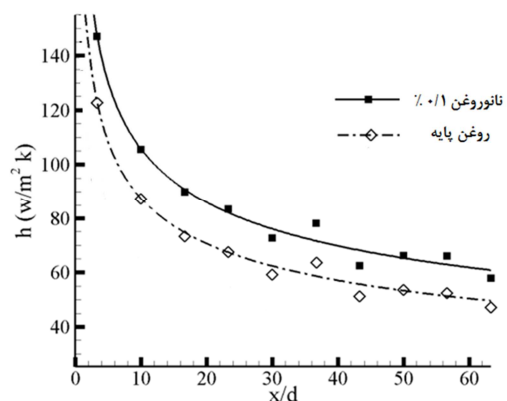
شکل ۳ نتایج تجربی به دست آمده برای ضریب انتقال گرمای همرفتی محلی را در مقایسه با نتایج به دست آمده از رابطه (۱۰) برای روغن پایه نشان می‌دهد که همخوانی قابل قبولی در این نتایج وجود داشته و میانگین خطاها در حدود ۱۱٪ می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه ضریب انتقال گرمای همرفتی تجربی برای روغن پایه در $Re=75$ در مقایسه با معادله (۱۰)

۲-۵- ضریب انتقال گرمای همرفتی نانوروغن

شکل ۴ تغییرات ضریب انتقال گرمای همرفت محلی در طول لوله را برای روغن پایه و نانوروغن با غلظت ۰/۱٪ در شار حرارتی $q'' = 7000 \frac{W}{m^2}$ برای $Re=75$ نشان را می‌دهد.



شکل ۴- ضریب انتقال گرمای همرفت در طول لوله برای روغن پایه و نانوروغن در $Re=75$

جدول ۴- خطای عدم اطمینان پارامترها آزمایشگاهی

خطای عدم اطمینان %	محدوده آزمایش	خطای اندازه‌گیری دستگاه	خاصیت اندازه‌گیری شده	محدوده کاری دستگاه	ابزار / خاصیت اندازه‌گیری
۱٫۴	۴۰-۲۰°C	۰٫۷°C	دمای سیال (T_f)	۱۳۰ تا -۴۵°C	ترموکوپل
۰٫۸	۸۵-۲۰°C	۰٫۷°C	دمای دیواره (T_w)	۱۳۰ تا -۴۵°C	ترموکوپل
۰٫۱۵	۸۰ - ۰	۰٫۱۷	ولتاژ (V)	۲۲۰ تا ۰V	ولت متر
۰٫۶	۲ - ۰	۰٫۱۷	جریان (A)	۲۰ تا ۰A	آمپر متر
۰٫۶	۲۰۰ - ۰	۱ml	دبی (Q)	۲۵۰ تا ۰ml	روتامتر
۷٫۴	۶۰-۲۳ kV	۰٫۱kV	ولتاژ شکست	۱۰۰ تا ۰ kV	دستگاه اندازه‌گیری ولتاژ شکست
۰٫۱	چگالی، رسانایی گرمایی، گرمای ویژه، لزجت				خواص

اعمال می‌گردد. محاسبات نشان می‌دهد که درصد عدم اطمینان برای ضریب انتقال گرمای همرفتی، عدد رینولدز و شار حرارتی به ترتیب ۰٫۱، ۳٫۷ و ۰٫۱ درصد است. همچنین خطای عدم اطمینان وسایل و دستگاههای آزمایشگاهی بر اساس مشخصات و دقت آنها در جدول ۴ آورده شده است. نتایج نشان میدهد که درصد خطای عدم اطمینان محاسبه شده و وسایل و دستگاههای آزمایشگاهی کمتر از ۱۰ درصد بوده که بر اساس این روش در محدوده قابل قبولی است و از قابلیت اطمینان خوبی برخوردار می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بهبود عملکرد روغن به عنوان سیال خنک‌کننده و عایق الکتریکی در ترانسفورماتورهای برق، در این تحقیق به مطالعه تجربی ضریب انتقال گرمای نانوروغن حاوی انوذرات کلئیدی اکسید آهن جهت استفاده در ترانسفورماتور که عملاً تحت شار گرمایی ثابت می‌باشد، پرداخته شده است. آزمایشهای گرمایی برای نمونه‌های مختلف نانوروغن در جریان آرام داخل لوله افقی صورت گرفته و نتایج با روغن پایه مقایسه گردیده است. همچنین به منظور بررسی تأثیر نانوذرات بر عملکرد عایق الکتریکی روغن، آزمایش ولتاژ شکست AC براساس استاندارد IEC60156 برای نمونه‌ها انجام گرفته است. نتایج نشان دهنده بهبود ضریب انتقال گرمای همرفت نانوروغن با غلظت حجمی ۰٫۱ درصد نسبت به روغن پایه به میزان ۴٫۵ درصد می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از آزمایش ولتاژ شکست AC نیز نشان داد که استقامت عایقی نانوروغن دارای ۲۳٫۸ درصد نسبت به روغن پایه بیشتر است. این موضوع به لحاظ الکتریکی و طراحی فواصل عایقی تجهیزات داخل ترانسفورماتور بسیار حایز اهمیت می‌باشد.

میدان مغناطیسی در فاصله بین دو الکتروود به دلیل ناهمگونی سطح^۱ افزایش می‌یابد، تجمع نانوذرات مغناطیسی بیشتر شده و به تشکیل یک پل بین دو الکتروود منجر می‌شود و شکست اتفاق می‌افتد. ولی درون نانو روغن سرعت گسترش استریمرها به دلیل سرعت حرکت پایین نانوذرات باردار شده کاهش می‌یابد و شکست دیرتر اتفاق می‌افتد.

۶- تحلیل درصد عدم اطمینان محاسبات

آنالیز عدم قطعیت برای تجهیزات استفاده شده در آزمایش بر اساس روش بکویت انجام گردیده است [۱۸]. برای محاسبه خطای عدم اطمینان پارامترهایی ضریب انتقال گرمای همرفتی، عدد رینولدز و گرمای حرارتی که بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده وسایل آزمایشگاهی و خواص در نظر گرفته شده مطابق جدول ۴ محاسبه می‌گردند، به ترتیب از روابط (۱۱) تا (۱۳) به دست می‌آیند. در این روش سهم هر یک از پارامترها در ایجاد خطا در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال U_p خطای اندازه‌گیری چگالی که در جدول ۴ تعیین گردیده بر ρ که معرف میانگین مقدار چگالی اندازه‌گیری شده می‌باشد تقسیم می‌گردد

$$h = \frac{q}{T_w - T_f} \frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_w - T_f}}{T_w - T_f}\right)^2} \quad (11)$$

$$Re = 4 \frac{\dot{Q} \rho}{\pi d \mu} \frac{U_{Re}}{Re} = \sqrt{\left(\frac{U_{\dot{Q}}}{\dot{Q}}\right)^2 + \left(\frac{U_{\rho}}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{U_{\mu}}{\mu}\right)^2} \quad (12)$$

$$q'' = \frac{VI}{\pi d L} \frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{U_I}{I}\right)^2} \quad (13)$$

تا سهمی از خطای محاسبه عدد رینولدز که از چگالی ناشی می‌شود، لحاظ شده باشد. این رویه برای دیگر پارامترها نیز

¹ Surface irregularities

² Beckwith

transformer oil and magnetite nanoparticles", in Proceeding of IEEE, pp. 619-622, 1998.

[6] Sartoratto P., Neto A., Lima E., de Sá A. R., Morais P., "Preparation and electrical properties of oil-based magnetic fluids", Journal of applied physics, vol. 97, no. 10, pp. 10Q917, 2005.

[7] Du Y.-f., Lv Y.-z., Wang F.-c., Li X.-X., Li C.-r., "Effect of TiO₂ nanoparticles on the breakdown strength of transformer oil", in Proceeding of IEEE, pp. 1-3, 2010.

[8] Lee J.-C., Kim W.-Y., "Experimental Study on the Dielectric Breakdown Voltage of the Insulating Oil Mixed with Magnetic Nanoparticles", Physics Procedia, vol. 32, pp. 327-334, 2012.

[9] Chiesa M. M., Sarit K. Das., "Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 335, pp. 88-97, 2009.

[10] Sheet M. S. D., MSDS, EFH-1 FERROFLUID, Ferro Tech Co., 2007.

[11] Jamshidi N., Farhadi M., Ganji D. D., Sedighi K., Experimental Investigation on the Viscosity of nanofluids, IJE Transactions B: Applications, vol. 25, no. 3, pp. 201-209, 2012.

[12] Syam Sundar L., Venkata Ramana E., Singh M. K., De Sousa A. C. M., "Viscosity of low volume concentrations of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture", Chemical Physics Letters, vol. 554, PP. 236-242, 2012.

[13] Wen D., Ding Y., "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 47, pp. 5181-5188, 2004.

[14] Pak B. C., Cho Y. I., "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", Experimental Heat Transfer an International Journal, vol. 11, no. 2, pp. 151-170, 1998.

[15] Yu W., Choi S., "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model", Journal of Nanoparticle Research, vol. 5, no. 1-2, pp. 167-171, 2003.

[16] Shah R. K., London A. L., Laminar flow forced convection in ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data: Academic press, 1978.

[17] Shah R. K., Bhatti M., "Laminar convective heat transfer in ducts, Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer", pp. 3.1-3.137, 1987.

[18] Beckwith T. G., Marangoni R. D., Lienhard J. H., Mechanical measurements: Pearson Prentice Hall, 2007.

۸- فهرست علائم

A	سطح مقطع لوله (m^2)
c_p	گرمای ویژه ($kJ/kg \cdot K^{-1}$)
d	قطر لوله (mm)
h	ضریب انتقال گرما ($W/m^2 \cdot K^{-1}$)
k	رسانایی گرمایی ($W/m \cdot K^{-1}$)
P	محیط لوله (m)
Pr	عدد پرانتل
q"	شار گرمایی (W/m^2)
\dot{Q}	دبی حجمی (m^3/s^{-1})
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
v	سرعت متوسط سیال در لوله (m/s)
V	حجم (ml)
w	نسبت وزنی
x^*	طول مشخصه
ρ	چگالی (kg/m^3)
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ϕ	غلظت حجمی (/.)
ν	سرعت سیال (ms^{-1})

۹- زیر نویس ها

bf	سیال پایه
cn	نانوذرات کلئیدی
f	سیال
nf	نانو سیال

مراجع

- [1] Shanthi R., Anandan S. S., Ramalingam V., "Heat transfer enhancement using nanofluids an overview", Thermal Science, vol. 16, no. 2, pp. 423-444, 2012.
- [2] Xuan Y., Li Q., "Heat transfer enhancement of nanofluids, International Journal of Heat and Fluid Flow", vol. 21, no. 1, pp. 58-64, 2000.
- [3] Saeedinia M., Akhavan-Behabadi M., Razi P., "Thermal and rheological characteristics of CuO-Base oil nanofluid flow inside a circular tube", International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 39, no. 1, pp. 152-159, 2012.
- [4] Beheshti A., Shanbedi M., Heris S. Z., "Heat transfer and rheological properties of transformer oil-oxidized MWCNT nanofluid", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 118, no. 3, pp. 1451-1460, 2014.
- [5] Segal V., Hjortsberg A., Rabinovich A., Natrass D., Raj K., "AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on