مجله مهندسی مکانیک، شماره پیایی ۲۴، جلد ۶۶، شماره ۱، بهار ۲۳۹۵، صفحه ۲۰۱–۱۱۶

تحلیل تجربی انتقال حرارت همرفتی نانوذرات کلوئیدی و پودری Fe₃O₄ درروغن ترانسفورماتورهای برق

جلال قاسمی [®]	استادیار، دانشگاه زنجان، دانشکده فنی
صمد جعفرمدار	استاد، دانشگاه ارومیه، دانشکده فنی و مهندسی
میثم نظری	دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، دانشکده فنی و مهندسی

چکیدہ

بررسی تجربی انتقال حرارت همرفت، در نانو روغن حاوی نانوذرات Fe₃O4 پودری و بدون پایدارساز و همچنین نانو روغن حاوی نانوذرات کلوئیدی Fe₃O4 به همراه پایدارساز هدف اصلی مقاله پیش رو است. بدین منظور، از روغن Nytro Libra که روغن متعارف در ترانسفورماتورهای قدرت است، Fe₃O4 به همراه پایدارساز هدف اصلی مقاله پیش رو است. بدین منظور، از روغن Nytro Libra که روغن متعارف در ترانسفورماتورهای قدرت است، به عنوان روغن پایه استفاده شده است. نتایج تحقیقات نشان میدهد ، استفاده از نانوذرات مشخصه های انتقال حرارت سیال پایه را بهبود میدهد. به عنوان روغن پایه استفاده شده است. نتایج تحقیقات نشان میدهد ، استفاده از نانوذرات مشخصه های انتقال حرارت سیال پایه را بهبود میدهد. همچنین براساس مشاهدات تجربی استفاده از نانوذرات به صورت پودری باعث کاهش و نانوذرات کلوئیدی باعث افزایش خاصیت دی الکتریک روغن ترانسفورماتور می گردد. لذا بررسی رفتار انتقال حرارتی این دو نوع نانوروغن حائز اهمیت خواهد بود. نتایج مطالعه پیش رو نشان میدهد که ضریب ترانسفورماتور می گردد. لذا بررسی رفتار انتقال حرارتی این دو نوع نانوروغن حائز اهمیت خواهد بود. نتایج مطالعه پیش رو نشان میدهد که ضریب ترانسفورماتور می گردد. لذا بررسی رفتار انتقال حرارتی این دو نوع نانوروغن حائز اهمیت خواهد بود. نتایج مطالعه پیش رو نشان میدهد که ضریب ترانسفورماتور روغن حاوی نانوذرات به شکل پودر در حالت شار حرارتی ثابت در لوله، با غلظت حجمی ۲۰۱۰٪ به ترتیب به میزان ۲٪ و ۳٫۰۰٪ به ترتیب به میزان ۲٪ نسبت به روغن پایه بیشتر است. در ادامه، دلایل رفتار انتقال حرارتی و ۵٫۹٪ نسبت به نانو روغن حاوی نانوذرات کلوئیدی و همچنین ۲۵٫۵٪ نسبت به روغن پایه بیشتر است. در ادامه، دلایل رفتار انتقال حرارتی نوروغن و وای دانو روغن وای در این زمینه نیز مورد توجه قرار گرفته و سازه در انتقال در این زمینه نیز مورد توجه قرار گرفته است.

واژەھاى كليدى: ترانسفورماتور، انتقال حرارت ھمرفتى، نانوروغن، نانوذرات.

Experimental Analysis of Colloidal and Powder Nanoparticles Effects on Theconvective Heat Transfer in Transformer Oil

J. Ghasemi	Assistant Professor, University of Zanjan, Department of Mechanical Engineering
S. Jafarmadar	Professor, University of Urmia, Department of Mechanical Engineering
M. Nazari	M.Sc. Student, University of Urmia, Department of Mechanical Engineering

Abstract

Experimental study of convective heat transfer in nano-fluid, containing Fe_3O_4 powder nano-particles without stabilizer and nano-fluid containing colloidal nanoparticles of Fe_3O_4 , with stabilizer, is the main aim of this work. For this purpose, the Nytro Libra oil, as a conventional oil in power transformers has been considered as the base oil. Results show thatthe use of nanoparticles, improves the base fluid heat transfer characteristics. Alsobased on the experimental observations, the use of nanoparticles in the powder form, decreases and in the colloidal form increases the dielectric properties of transformer oil. Hence, the thermal behavior of the two types of nano-oils would be important. The results in present study showed that the convective heat transfer coefficient of nano-fluid, containing nano-particles in the powder form in a tube with constant heat flux, and volume concentration of 0.1% and 0.3%, is 7% and 9.5% mare than nano-oil containing colloidal particles and also 6.5% and 2.4% higher than the base oil, respectively. Finally, thermal behavior of different nano-oils samples are discussed, and other researcher's arguments are also taken into consideration.

Keywords: Transformer Oil, Powder Nanoparticles, Colloidal Nano fluid, Heat Transfer.

نويسنده مكاتبه كننده، آدرس پست الكترونيكي: j.ghasemi@znu.ac.ir

تقار

ترانسفورماتورها یکی از تجهیزات مهم و گران قیمت در صنعت برق میباشند که بهبود سیستم خنککاری آن میتواند تأثیر بسزایی در کارایی و طول عمر آن داشته باشد. روغن در ترانسفورماتور علاوه بر داشتن نقش عایق الکتریکی، نقش اصلی به عنوان سیال خنککننده را نیز دارد. بدلیل بالا رفتن دمای بوبینها درنتیجه بازده خنککاری پایین روغن، بهبود مشخصههای انتقال حرارت آن جهت استفاده بهینه از ترانسفورماتور و کاهش محدودیتهای ناشی از آن مورد توجه محققان و متخصصین این حوزه میباشد.

در دهههای اخیر استفاده از نانوذرات به منظور بهبود انتقال حرارت در انواع سیال پایه از جمله روغن رشد چشمگیری داشته است. چوی و همکارانش [۱]با افزودن نانوذرات آلومینا و آلومینیوم نیترید درون روغن ترانسفورماتور با غلظت حجمی ۵٬۰٪ به افزایش ۸٪ در رسانایی حرارتی روغن و افزایش ۲۰٪ در ضریب انتقال حرارت كليرسيدند. ژوانو همكاران [۲] با افزودن نانوذرات مس با غلظت ۷٫۵٪ و اندازه ذرات ۱۰۰ نانومتر به افزایش ۴۵٪ در رسانایی حرارتی روغن ترانسفورماتور دست یافتند. سعیدی نیا و همکاران[۳]، خواص ترموفیزیکی و رئولوژیکی نانوسیال روغن پایه و اکسید مس را درون لوله افقی بررسی کرده و نشان دادند با افزودن نانوذرات درون روغن، رسانایی حرارتی افزایش یافته و برای غلظتهای زیر ۲٪ نانوروغن رفتار نیوتنی دارد. افزایش ۱۲٬۷٪ ضریب انتقال حرارت در غلظت حجمی ۲٪ در اعداد رينولدز بالا از ديگر نتايج اين پژوهش بود. با توجه به حساس بودن عملکرد روغن ترانسفورماتور به پارامترهای مختلف، اثر افزودن نانوذرات در تغيير مشخصههای روغن ترانسفورماتور بايد مورد بررسی قرار گیرد. هریس و همکاران [۴] تأثیر افزودن نانولولههای کربن را درون روغن ترانسفورماتور برای غلظتهای حجمی زیر ۰٬۰۱۱٪ در دو حالت انتقال حرارت آزاد و اجباری بررسى كردند. بررسى تغييرات مشخصههايي مانند ولتاژ شكست، نقطه اشتعال، نقطه ریزش، چگالی، رسانایی الکتریکی و گرمایی، لزجت و تنش برشی نیز در این پژوهش انجام شده است. سگال [۵] با افزودن نانوسيال مغناطيسي اكسيد آهن درون روغن ترانسفورماتور مشاهده نمود که ولتاژ شکست عایقی نانوروغن و روغن پایه تفاوت چندانی ندارد و ولتاژ شکست در حالت ضربه برای نانوروغن ۵۰٪ نسبت به روغن پایه بهبود داشته است. دو و همكارانش [۶] از نانوذرات اكسيد تيتانيوم (TiO₂) با قطر متوسط ۲۰nm در روغن ترانسفورماتور استفاده کردند. افزایش ۵۳٪ در ولتاژ شکست نانو روغن در مقایسه با روغن پایه از نتایج این پژوهش است.

در این مقاله مقایسه تأثیر نانوذرات پودری و کلوئیدی بر انتقال حرارت روغن ترانسفورماتور در جریان آرام درون لوله افقی انجام شده است.

۲- تهیه نانوروغن

برای تحقیق حاضر دو نمونه نانوروغن تهیه گردیده است. نمونه اول از پخش کردن نانوذرات پودری اکسید آهن (Fe₃O4) درون روغن ترانسفورماتور Nytro Libra تهیه گردید که نانوذرات اکسید آهن به شکل پودربا استفاده از دستگاه اولتراسونیک(HD 2200) handelinsonopuls به مدت اولتراسونیک(بال (در غلظتهای حجمی ۲۰٪ درین روغن ترانسفورماتور پخش شدند. برای محاسبه غلظت حجمی ابتدا نسبت وزنی نانوذرات و روغن پایه، W به دست آمده و سپس با استفاده از رابطه (۱) غلظت حجمی به دست میآید [۷]:

$$\varphi = \frac{w\,\rho_f}{\rho_p(1-w) + w\rho_f} \tag{1}$$

در این رابطه ρ_f چگالی روغن و ρ_p چگالی نانوذرات میباشد. پایداری نمونه یک کمتر از یک روز میباشد.

ی. پی رای ۲ می از را یا ۲ را یا را را یا را را یا را را یا را را یا برای تهیه نمونه دوم از نانوسیال مغناطیسی خریداری شده از شرکت Ferrotech با نامتجاری FH-1 استفاده گردیده است. این محصول شامل ۵٪ نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن، ۱۵٪ پایدارساز و ۸۰٪ سیال پایه آلی (هیدروکربن سبک) می باشد لذا برای به دست آوردن غلظت حجمی این نانو روغن از رابطه (۲) استفاده می گردد[۸]:

$$\varphi = \left(\frac{V_N * 0.05}{V_O + V_N}\right) \tag{7}$$

مطابق با این رابطه به ترتیب با افزودن ۸ و ۲۴ سی سی از محلول نانوسیال EFH-1 درون ۴۰۰ میلی لیتر از روغن پایه ترانسفورماتور و استفاده از دستگاه اولتراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه به ترتیب نانو روغن با غلظت های ۰٫۱٪ و ۰٫۳٪ به دست میآید. جدول ۱ خواص ترموفیزیکی روغن ترانسفورماتور، نانوذرات اکسید آهن و نانوسیال مغناطیسی EFH-1 را نشان می دهد [۱۰،۹].

جدول۱- خواص ترموفیزیکی روغن، نانوذرات و نانوسیال مغناطیسی

لزجتدی نامیک	گرمای ویژه	رسانایی حرارتی	چگالی	مادہ
١٣,٧	1880	•,178	٨٨٠	روغن ترانسفورماتور
-	۶۷.	۴، ۸	۵۱۸۰	نانوذرات اكسيد آهن
۶	1810	۰,۱۷۵	1177	نانوسيال مغناطيسي EFH-1

¹ Surfactant

$$h(x) = \frac{q''}{(T_w - T_f)_x}$$
(9)

که $p^{"}$ شار حرارتی، $T_{W} e^{T}$ به ترتیب دمای دیواره و دمای $q^{"}$ می سیال بوده و X فاصله محوری از ورودی قسمت اصلی آزمایش می باشد. شار حرارتی از رابطه زیر به دست میآید: $q^{"} = \frac{Q}{\pi dL}$ (۱۰)

که
$$d$$
 قطر لوله، L طول قسمت اصلی آزمایش و Q آهنگ کل
انتقال حرارت است که از رابطه زیر محاسبه می شود:
 $Q = VI$ (۱۱)

که V ولتاژ منبع تغذیه و I جریان عبوری از سیم نیکل-کروم میباشد.طبق اصل بقای انرژی توزیع دمای حجمی سیال در طول لوله از رابطه زیر به دست میآید: $T_{f} = T_{in} + \frac{q^{"} . P.x}{\rho. C_{p}. \vartheta. A}$

که در اینجا،
$$\rho$$
 چگالی، P محیط لوله، A سطح مقطع لوله و ϑ سرعت متوسط سیال است. بنابراین ضریب انتقال حرارت ϑ ممرفت متوسط از رابطه(۱۳) به دست میآید:
 $\overline{h} = \frac{q^{"}}{(\overline{T_w} - \overline{T_f})}$

که \overline{T}_f متوسط دمای دیواره و \overline{T}_W میانگین دمای حجمی سیال است. افت فشار نیز با استفاده از معادله (۱۴) به دست میآید: $\Delta P = f \frac{L V^2}{\pi}$ (۱۴)

$$P = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} \tag{1}$$



شکل۱– شکل شماتیک دستگاه تجربی

۳- دستگاه آزمایش

شکل ۱ تصویر شماتیک دستگاه تجربی استفاده شده برای تحلیل انتقال حرارت همرفتی را نشان میدهد که شامل یک پمپ ، قسمت اصلى آزمايش، مبدل خنك كننده، بالابرنده'، مخزن اولیه و ثانویه می باشد. یک شیر کنار 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 می باشد. سیم نیکل-کروم به دور لوله پیچیده شده و پوشش پشم شیشه برای جلوگیری از هدر رفت حرارت محوری استفاده شد. دو سر سیم نيكل-كروم به يك منبع تغذيه AC متصل مي شود؛ بنابراين شار حرارتی میتواند بوسیله تغییرات ولتاژ تنظیم شود. ده عدد ترموکوپل ۱۶۰- SMT در فواصل یکسان در لوله قسمت اصلی آزمایش قرار داده شد تا دمای ورودی و خروجی را اندازه گیری کند. دادهها از ترموکوپل هر ۱۰ ثانیه جمع آوری می گردد. جریان پس از گذشتن از قسمت اصلی آزمایش وارد بالابرنده شده تا از پیوستگی جریان اطمینان حاصل شود. دبی با استفاده از میزان سیال جمع شده در یک ظرف مدرج در طی یک بازه زمانی مشخص محاسبه می شود. سیال پس از عبور از خنک کن وارد مخزن اولیه شده و چرخه ادامه پیدا میکند. خنککن یک مبدل پوسته لولهای است که آب سرد به صورت معکوس از پوسته آن توسط یک یمپ به چرخش در میآید.

۳-۱-مبانی تئوری نانوروغن و معادلات حاکم

خواص ترموفیزیکی نانوروغن در دمای حجمی سیال طبق مراجع[۱۳،۱۲،۱۱،۳] با استفاده از روابط (۳) تا (۸) محاسبه می گردد.

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_p \tag{(7)}$$

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5 \,\varphi) \mu_{bf} \tag{(f)}$$

$$C_{p_{nf}} = (1 - \varphi)(C_p)_{bf} + \varphi(C_p)_p \tag{(a)}$$

$$k_{nf} = \kappa \left(\frac{k_p + 2k + 2(k_p - k)(1 + \beta)^3 \varphi}{k_p + 2k - (k_p - k)(1 + \beta)^3 \varphi} \right)$$
(%)

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} \cdot v.d}{\mu_{nf}} \tag{Y}$$

$$Pr_{nf} = \frac{\mu_{nf} \cdot C_{P_{nf}}}{k_{nf}} \tag{(\lambda)}$$

¹ riser

۴–۱– صحت سنجی دادهها

تحليل

تكربني

انتقال حرارت همر

. ال

نانوذرات

به منظور بررسی دقت دستگاه تجربی، ضریب انتقال حرارت با استفاده از رابطه (۱۵) از مراجع[۱۵،۱۴] با داده های تجربی در کار حاضر برای روغن پایه در Re=۷۵ و شرایط مرزی یکسان مقایسه گردیده است.

شکل ۲ نتایج تجربی به دست آمده را در مقایسه با نتایج به دست آمده از رابطه (۱۵) نشان میدهد که همخوانی خوبی در این نتایج وجود داشته و میانگین خطاها در حدود ۱۱٪ میباشد:

$$h = \begin{cases} \frac{k}{d} (3.303x_*^{-\frac{1}{3}} - 1.00) & x_* \le 0.00005 \\ \frac{k}{d} (1.302x_*^{-\frac{1}{3}} - 0.50) & 0.00005 \le x_* \le 0.0015 ; \quad x_* = \frac{x}{d \cdot \operatorname{Re} \cdot \mathrm{F}} \\ \frac{k}{d} (4.364 + 8.68 \left(10^3 x_* \right)^{-0.506} e^{-41x}) & x_* \ge 0.001 \end{cases}$$
(1 Δ)

شکل۳ ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز برای جریان آرام روغن پایه در داخل لوله را نشان میدهد که در مقایسه با مقادیر تئوری که از رابطه:

$$f = \frac{64}{Re} \tag{19}$$

محاسبه می گردد همخوانی قابل قبولی را دارد.



شکل۲ – مقایسه ضریب انتقال حرارت تجربی در مقایسه با معادله(۱۵) بر حسب فاصله طولی بی بعد شده



شکل۳- ضریب اصطکاک تجربی و تئوری بر حسب عدد رینولدز

۲-۴- ضریب انتقال حرارت همرفت

شکل ۴ و ۵ بترتیب تغییرات ضریب انتقال حرارت همرفت در طول لوله را برای نانوروغن پودریوکلوئیدی در شار حرارتی ۲۷۰۰w/m² = "q برای غلظتهای ۰٫۱۰٪ و ۰٫۳٪ نشان میدهد. نتایج حاکی از آن است که نانوروغن حاوی نانوذرات پودری دارای ضریب انتقال حرارت بهتری در مقایسه با نانوروغن حاوی نانوذرات کلوئیدی می باشد.



شکل۴- ضریب انتقال حرارت در راستای لوله برای نانو روغن حاوی نانو ذرات پودری وکلوئیدی با غلظت حجمی۰٫۱٪ درشارحرارتی²w/m q^{*} =۲۷۰۰



شکل۵- ضریب انتقال حرارت در راستای لوله برای نانو روغن حاوی نانو ذرات پودری وکلوئیدی با غلظت حجمی۲٬۲۰٪ درشارحرارتی² q["] =۲۷۰۰

بهبود انتقال حرارت در نانوسيالات عمدتا تحت تأثير عوامل متعددی مانند حرکت براونی ذرات، لایه سیال احاطه کننده ذره، حرکت بالستیک فونون های حامل انرژی و توده شدن ٔ ذرات می باشد. در این میان توده شدن نانوذرات بیشترین تأثیر را در تغییر مشخصههای انتقال حرارت در نانوسیالات ایفا میکند[۱۶]. مدلهای مختلفی برای ارائه بهترین حالت برای توده شدن در جهت بهبود انتقال حرارت گزارش شده است. در شکل ۶ مشاهده می شود که هرقدر توده شدن، حالت کریستالی و منظم پیدا کند تأثیر کمتری در افزایش رسانایی حرارتی دارد و بهترین حالت توده شدن، حالت بی نظم است؛ مخصوصاً در حالتی که لایهای از سیال حول نانوذرات را گرفته باشد که باعث افزایش چشمگیر رسانایی حرارتی می شود [۱۷].حرکت براونی ذرات تأثیر مستقیم اندکی در بهبود انتقال حرارت رسانشی نانوذرات داشته و مهم ترین اثر حرکت براونی ذرات به صورت غیر مستقیم بوده، به اینصورت که حرکت براونی با کمک به توده شدن بیشتر ذرات نقش مهمی در بهبود انتقال حرارت ایفا میکند[۱۶].

بنابراین میتوان عملکرد بهتر انتقال حرارت در نانو روغن حاوی نانوذرات پودری در مقایسه با نانوروغن کلوئیدی را در شکل تودهای شدن ذرات بر اساس مدل ارائه شده در مرجع[۱۷] توجیه نمود که هر چه نانوذرات درون نانوروغن امکان بیشتری برای بهم چسبیدن به صورت نامنظم داشته باشند، قادر به عبور گرمای بیشتری خواهند بود.



شکل۶- افزایش رسانایی حرارتی نانوسیال به دلیل توده شدن نانوذرات (¢ نسبت حجم نانوذره به کل حجم توده) [۱۷]

۴–۳– تأثیر شار حرارتی

به منظور بررسی تأثیر شار حرارتی روی عملکرد حرارتی نمونههای نانو روغن، شار حرارتی اعمالی دیگری برابر با۲= q["] مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۷- ضریب انتقال حرارت در راستای لوله برای نانوروغن حاوی نانوذرات پودری و کلوئیدی با غلظت حجمی ۰٫۱٪ در شار حرارتی q["] =۷۰۰۰w/m²

شکل ۷ و ۸ بترتیب تغییرات ضریب انتقال حرارت همرفت در طول لوله را برای نانوروغن پودری و کلوئیدی در شار حرارتی ۳۰۰۰w/m² = "p برای غلظت ۰/۰٪ و ۰/۰٪ نشان میدهد. نتایج این شکلها بیانگر آنست که با اعمال شار حرارتی بیشتر، نانوروغن پودری دارای عملکرد حرارتی بهتری نسبت به نانوروغن کلوئیدی در مقایسه باحالت شار حرارتی باشد.

¹ Phonon

² Clustring



شکل۸- ضریب انتقال حرارت در راستای لوله برای نانوروغن حاوی نانوذرات پودری و کلوئیدی با غلظت حجمی ۲۰٫۳٪ در شار حرارتی q["] =۷۰۰۰ w/m2

با استفاده از معادله(۱۵)، ضریب انتقال حرارت متوسط نیز محاسبه شده و با نتایج تجربی که در دمای متوسط دیواره و دمای متوسط حجمی سیال به دست آمده بود مقایسه گردید که نتایج آن در جدول ۲ آمده است. نتایج بیانگر آنست که هرچه شار حرارتی اعمالی و غلظت حجمی نانوذرات افزایش مییابد نانوروغن حاوی نانوذرات پودری در مقایسه با نانوذرات کلوئیدی دارای ضریب انتقال حرارت متوسط بالاتری میباشد. به عنوان مثال در شار حرارتی ۳ ۸/۰۰ سریب انتقال حرارت متوسط نانوروغن پودری به شار حرارتی ۷/۰/۳ و ۱۹/۰٪ از نانوروغن کلوئیدی و ۳۶/۶٪ و ۲/۱۲/۲ نسبت به روغن پایه بیشتر میباشد. در شارهای حرارتی پایین نعلت غالب شدن اثرات لزجت ناشی از افزودن نانوذرات، شاهد افت انتقال حرارت نسبت به روغن پایه هستیم درحالیکه در شارهای حرارتی بالاتر به دلیل کمرنگتر شدن اثرات لزجت، تأثیر نانوذرات در بهبود انتقال حرارت بهتر نمایان میشود.

$\begin{array}{c} 0.8 \\ 0.6 \\ 0.6 \\ 0.4 \\ 0.2 \\ 0.2 \\ 0.6 \\ 0.4 \\ 0.2 \\ 0.6 \\ 0.4 \\ 0.2 \\ 0.1 \\$

افت فشار روغن ترانسفورماتور پایه، نانوروغن پودری و کلوئیدی برای جریان آرام در شرایط یکسان اندازه گیری گردید

که شکل ۹ ضریب اصطکاک بر حسب اعداد رینولدز را برای

نمونههای مختلف نشان میدهد. همانگونه که مشاهده میشود اختلاف بین ضریب اصطکاک روغن پایه و نمونه نانوروغنها ناچیز

شکل ۹- مقایسه ضریب اصطکاک نمونههای نانو روغن و روغن پایه

۵- آناليز عدم قطعيت

۴-۴- افت فشار

مىباشد.

آنالیز عدم قطعیت برای تجهیزات استفاده شده در آزمایش بر اساس مرجع [۱۸] انجام شد و نتایج در جدول ۳ نشان داده است. همچنین این جدول شامل خطای عدم قطعیت برای دخیل در آزمایش می باشند.

شار حرارتی (w/m ²)			• /)	%	• /٣	%
		روغن پايه	پودرى	كلوئيدى	پودرى	كلوئيدي
	ضريب انتقال حرارت (أزمايش)	۸۲ _/ ۶۶	۷۸٬۵۱	۷۳٬۹۷	۲۳٬۳۱	۶۸٬۷۲
T V	ضریب انتقال حرارت (معادله (۱۵))	٩٣,٩٣	٩١,٢٩	٨٢,١٩	<i>٨۶</i> ٫۹۱	۸۲٫۸۰
,,,	انحراف (٪)	۱۱/۹۱	۱۳٬۵۳	٩,۶٧	۱۰,۰۰	۱۷٫۰ ۱
	بهبود نسبت به روغن پايه (٪)	-	-Δ	- ۱ • <i>,</i> Δ ۱	-11,771	-18,88

جدول۲- ضریب انتقال حرارت متوسط براساس دادههای تجربی و معادله(۱۵)

$Re = 4 \frac{\dot{Q\rho}}{\pi d\mu} \frac{U_{Re}}{Re} = \sqrt{(\frac{U_Q}{\dot{Q}})^2 + (\frac{U_p}{\rho})^2 + (\frac{U_\mu}{\mu})^2} = 3.7\%$	$h = \frac{q}{T_w - T_f} \frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_w} - T_f}{T_w - T_f}\right)^2} = 0.1\%$
$q = \frac{VI}{\pi dL} \frac{U_q}{q} = \sqrt{\left(\frac{U_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{U_I}{I}\right)^2} = 0.098\%$	$Nu = \frac{hd}{k} \frac{U_{Nu}}{Nu} = \sqrt{\left(\frac{U_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{U_k}{k}\right)^2} = 0.14\%$

خطای عدم	محدوده آزمايش	خطای	خاصیت اندازه گیری	محدوده کاری	ابزار / خاصيت
اطمينان ٪		اندازهگیری دستگاه	شده	دستگاه	اندازهگیری
٩٫٢	۴۰-۲۰°C	• , Y°C	دمای سیال (<i>T_f</i>)	۴۵°C - تا ۱۳۰	ترموكوپل
۸, •	۸۵-۲۰°C	۰٫۷°C	(T_w) دمای دیواره	۴۵°C - تا ۱۳۰	ترموكوپل
۰,۱۵	٨٠	۰,۱ V	ولتاژ (V)	V تا ۲۲۰	ولت متر
۶ _۱ ۶	۲ – ۰	۰,۱ V	جريان (A)	A۰ تا ۲۰	آمپرمتر
۶ _۱ ۰	۲۰۰ – ۰	۱ml	دبی (Q)	ml تا ۲۵۰	روتامتر
٠,١	چگالی، رسانایی حرارتی، گرمای ویژه، لزجت				خواص

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق ضریب انتقال حرارت همرفت نانوروغن ترانسفورماتور حاوی نانوذرات پودری و کلوئیدی تحت شار حرارتی ثابت در جریان آرام درون لوله افقی به دست آمده و باهم مقایسه شده است. نتایج نشان داد که در حالت کلی نانوروغن حاوی نانوذرات پودری قابلیت بهتری در انتقال حرارت در مقایسه با نانوروغن حاوی نانوذرات کلوئیدی دارد. همچنین با اعمال شار حرارتی بیشتر نانوروغن پودری عملکرد بهتری پیدا میکند. در شارهای حرارتی پایین بعلت اثرات لزجت ناشی از افزودن نانوذرات بر سایر مشخصه ها خصوصاً عدد رینولدز، لذا افت انتقال حرارت در مقایسه با روغن پایه را به همراه خواهد داشت. این نتایج با پژوهش ارائه شده در مرجع[۱۴] درباره اثر توده شدن ذرات در انتقال حرارت رسانشی کاملاً تطابق دارد و نتایج نیز نشان داد هرچه نانوذرات درون سیال پایه قابلیت بیشتری در توده شدن داشته باشد، قادر به انتقال حرارت بهتری نیز خواهد بود.

فهرست علائم

V	حجم (ml)
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رينولدز
w	نسبت وزنى
Т	دما (K)
q	شار حرارتی (wm- ²)
h	ضریب انتقال حرارت (wm ⁻² K ⁻¹)

k	رسانایی حرارتی (wm ⁻¹ K ⁻¹)
C_p	گرمای ویژه (kgkg ⁻¹ K ⁻¹)
d	قطر لوله (mm)
ΔP	افت فشار (m)
f	ضريب اصطكاك
<i>x</i> *	طول مشخصه

علايم يوناني

چگالی (kgm ⁻³)	ho
لزجت دینامیکی (kgm ⁻¹ s ⁻¹)	μ
غلظت حجمی (٪)	arphi
نسبت ضخامت لایه سیال به قطر نانوذره	β
سرعت سیال (ms ⁻¹)	ν

زيرنويسها

0
bf
nf
р
w

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. of heat and mass transfer, vol. 45, no. 4, pp. 855-863, 2002.

[17] Eastman J., Choi U., Li S., Soyez G., Thompson L., DiMelfi R., "Novel thermal properties of nanostructured materials", Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, vol. 2, pp. 629-634, 1999.

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

[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] Rea U., McKrell T., Hu L.-w., Buongiorno J., "Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer", vol. 52, no. 7, pp. 2042-2048, 2009. [6] Segal V., et al., "AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles", Electrical Insulation, 1998. Conference Record of the, IEEE International Symposium on, IEEE, 1998. [7] Du Y.-f., et al., "Effect of TiO 2 nanoparticles on the breakdown strength of transformer oil. Electrical Insulation (ISEI)", Conference Record of the IEEE International Symposium on, IEEE, 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] Sheet M. s. d., MSDS, EFH-1 FERROFLUID Ferro Tech Co., 2007.

[10] Chakraborty, Experimental Characterizations of the Magnetic and Thermal Properties of Ferrofluid, Thesis, Jadavpur University, 2008.
[11] 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.

[12] Xuan Y., Roetzel W., "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 43, no. 19, pp. 3701-3707, 2000.

[13] 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.

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

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

[16] Keblinski P., Phillpot S., Choi S., Eastman J., "Mechanisms of heat flow in suspensions of nanosized particles (nanofluids)", International journal