بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی

تجزیه و تحلیل تجربی استفاده از نانو ذرات در روغن ترانسفورماتورهای قدرت به منظور بهبود عملکرد خنک‌کاری آن

میثم نظری

اساتید راهنما

دکتر صمد جعفر مدار

دکتر جلال قاسمی

شهریور ۱۳۹۳

کلیه حقوق این اثر متعلق به دانشگاه ارومیه است.

دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

تجزیه و تحلیل تجربی استفاده از انواع نانو ذرات در روغن ترانسفورماتورهای قدرت به منظور بهبود عملکرد خنک‌کاری آن

دانشجو:

میثم نظری

این پایاننامه به عنوان بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی مقطع کارشناسی ارشد مهندسی **مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی** در تاریخ توسط هیئت داوران ذیل مورد پذیرش قرار گرفت.

استاد راهنمای اول: دکتر صمد جعفر مدار

استاد راهنمای دوم: دکتر جلال قاسمی (از دانشگاه زنجان)

داور خارجی:

داور داخلی:

نماینده تحصیلات تکمیلی:

کلیه حقوق این اثر متعلق به دانشگاه ارومیه است.

دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

تعهد نامه پژوهشی

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایاننامه های تحصیلی دانشجویان دانشگاه ارومیه مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشجو میباشد که با استفاده از اعتبارات دانشگاه انجام میشود، برای آگاهی دانشجو و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان گرامی نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد میشوند:

۱. قبل از چاپ پایان نامه خود، مراتب را بطور کتبی به مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه اطلاع و کسب اجازه نمایند.

۲. در انتشار نتایج پایان نامه در قالب مقاله، همایش، اختراع، اکتشاف و سایر موارد ذکر نام دانشگاه ارومیه الزامی است.

۳. انتشار نتایج پایان نامه باید با اطلاع و کسب اجازه از استاد راهنما صورت گیرد.

اینجانب **میثم نظری** دانشجوی گرایش **تبدیل انرژی** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهدات فوق و ضمانت اجرایی آنرا قبول کرده و به آن ملتزم میشوم.

تاریخ و امضا دانشجو

تقدیم به

پدر و مادر فداکار و برادران و خواهران عزیزم

تشکر و قدردانی:

خداوند را برای الطاف بیکران و نعمات بی دریغش سپاس می گویم.

بر خود لازم می‌دانم از راهنمایی‌های ارزشمند اساتید راهنمای گرانقدر دکتر صمد جعفرمدار و دکتر جلال قاسمی (استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه زنجان) کمال تشکر را داشته باشم. این تحقیق بدون زحمات و پیگیری‌های دکتر محمدحسین رسولی فرد (دانشیار گروه شیمی دانشگاه زنجان) و دکتر سید هادی حسینی (استادیار گروه برق دانشگاه زنجان) و دکتر رسول محرمی (استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه زنجان) به نتیجه ای درخور نمی‌رسید. کمک‌های بی دریغ و دلسوزانه مدیران محترم آزمایشگاه مواد، انبار و بازرگانی شرکت ایران ترانسفو زنجان، ریاست و پرسنل محترم شرکت پالایش روغن زنگان و شرکت نیروتبادل عامل مهمی جهت پیشرفت پایان نامه پیش رو بوده است. همراهی‌های بی دریغ مهندس رامین ساجدی و دکتر شاهین نصیری وطن سهم بسزایی در به ثمر نشستن این پژوهش داشته است. همچنین از تمامی دوستان ، همکاران و عزیزانی که در این پژوهش یاریگر اینجانب بوده اند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

چکیده

در این پژوهش تاثیر افزودن نانوذرات به روغن ترانسفورماتور، در بهبود خواص حرارتی و عایقی روغن بصورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور علاوه تهیه چند نوع نانوذرات بصورت پودر و یا سوسپاسیون از داخل و یا خارج کشور، چند نمونه نیز به روش سنتز هم رسوبی در دانشگاه زنجان تولید گردید. سپس این ذرات درون روغن ترانسفورماتور Nytro Libra توسط همزن و دستگاه‌های اولتراسونیک پخش گردید. نانوروغن تولید شده در غلظت‌های ۰.۱٪ تا ۰.۶٪ مورد آزمایش‌های متعدد از جمله تست عایقی روغن بر اساس استانداردهای موجود و تست حرارتی قرار گرفت. برای مطالعه تاثیر نانوذرات روی خنک‌کاری روغن، دستگاه آنالیز حرارتی نانوسیالات، طراحی و ساخته شد. تست ولتاژ شکست عایقی روغن شامل تست AC و ضربه (impulse) روی نمونه‌های نانوروغن و روغن پایه انجام شد. نتایج حاکی از بهبود ۱۷ درصدی ولتاژ شکست ضربه در غلظت ۰.۳٪ بود که در تست‌های الکتریکی بعنوان بهترین غلظت انتخاب شد. همچنین ولتاژ شکست AC نانوروغن در شرایط بهینه بهبود ۳۰ درصدی را نشان می‌داد. در تست‌های حرارتی نیز در شارهای حرارتی بالا بعلت بهبود رسانایی حرارتی، نانوروغن دارای ۳۰٪ ضریب انتقال حرارت بالاتری نسبت به روغن معدنی پایه بود. در شارهای حرارتی پایین به دلیل اثرات ویسکوزیته ناشی افزودن نانوذرات شاهد کاهش ضریب انتقال حرارت بودیم. نتایج نشان داد، نانوروغن می‌تواند جایگزین مناسبی با خواص بهتری برای روغن معدنی ترانسفورماتور باشد.

واژه‌های کلیدی : نانوذرات،روغن ترانسفورماتور، خنک‌کاری، عملکرد عایقی.

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه و پیشینه پژوهش ۱

۱-۱- مقدمه ۲

1-2- پیشینه پژوهش ۳

فصل ۲: مبانی تئوری نانوسیالات و کاربرد آن در ترانسفورماتورها ۹

۲-۱- خنک‌کاری در ترانسفورماتورها ۱۰

2-2- روغن ترانسفورماتور ۱۱

۲-۲-۱- خرابی و زوال روغن ۱۳

۲-۲-۲- عوامل پیری روغن ۱۳

۲-۲-۳- آزمایشات روغن ۱۵

2-3- نانوسیالها و کاربرد آنها ۱۹

۲-۳-۱- خواص ترموفیزیکی نانوسیالات: ۲۰

۲-۳-۲- مکانیزم‌های انتقال حرارت در نانوسیالات: ۲۲

۲-۳-۳- نانوسیال‌های مغناطیسی و خواص آنها: ۲۸

۲-۳-۴- نانو روغن در ترانسفورماتور ۳۰

فصل ۳: تحلیل تجربی انتقال حرارت و عملکرد عایقی نانوروغن در ترانسفورماتور ۳٤

۳-۱- تولید نانو روغن ۳۵

۳-۱-۱- تولید نانوروغن دارای نانوذرات اکسید آهن ($Fe3O4$) ۳۶

۳-۱-۲- نمونه های تولید شده برای آزمایش ۳۹

۳-۲- دستگاه آنالیز حرارتی نانوسیالات ۴۱

۳-۳- آنالیز انتقال حرارت نانو روغن ۴۳

۳-۳-۲- مشخصات رژیم جریان ۴۵

۳-۴- آزمایش‌ها و دستگاه آنالیز عایقی روغن ۴۷

۳-۴-۱- تست ولتاژ شکست عایقی متناوب (AC) ۴۸

۳-۴-۲- تست ولتاژ شکست ضربه ۴۹

فصل ٤: بحث و نتیجه گیری ۵۱

۴-۱- نتایج ۵۲

۴-۱-۱- نتایج تست‌های الکتریکی ۵۲

۴-۱-۲- نتایج تست‌های حرارتی..... ۵۴
۴-۲- آنالیز قابلیت اطمینان..... ۵۸
۴-۳- نتیجه‌گیری..... ۵۹
۴-۴- پیشنهادها..... ۵۹

فصل ۵: پیوست **۶۱**
۵-۱- اختراعات ثبت شده در حوزه نانوروغن ترانسفورماتور..... ۶۲
۵-۲- کد فرترن محاسبات انتقال حرارت با استفاده ازاطلاعات سنسورها..... ۶۴

فصل ٦: مراجع **٦٨**

فهرست اشکال

شکل (۲-۱) دستگاه اندازه گیری ولتاژ شکست AC ۱۸
شکل (۲-۲) شکل استاندارد الکترودها برای اندازه گیری ولتاژ شکست ضربه ۱۸
شکل (۲-۳) نقش ضخامت سیال اطراف ذره در افزایش رسانایی حرارتی نانوسیال [Keblinski, 2002] ۲۴
شکل (۲-۴) تصویر شماتیک از حرکت بالستیک فونون نفوذی درون ذره جامد[Keblinski, 2002] ۲۶
شکل (۲-۵) افزایش رسانایی حرارتی نانوسیال به دلیل توده شدن نانوذرات (ϕ نسبت حجم نانوذره به کل حجم توده)[Keblinski, 2002] ۲۷
شکل (۲-۶) نانوسیال دارای نانوذرات پوشش سطحی داده شده توسط پایدارساز ۲۹
شکل (۲-۷) ولتاژ شکست نانوروغن در غلظت‌های مختلف نانوذرات بر حسب فاصله الکترودها [Kopčanský, 2005] ۳۱
شکل (۲-۸) ولتاژ شکست روغن و نانوروغن برحسب فاصله الکترودها درحالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی[Lee, 2012] ۳۲
شکل (۲-۹) ولتاژ شکست نانوروغن با پایدارسازهای مختلف بر حسب غلظت نانوذرات تیتانیا [Du, 2010] ۳۲
شکل (۲-۱۰) منحنی مغناطیسی: الف)پرس بورد کاملا خشک ب)پرس بورد آغشته به نانوروغن دارای ذرات مغناطیسی ج)پرس بورد پس از شستشوی نانوذرات با روغن پایه[V. Segal, 1999] .. ۳۳
شکل (۳-۱) تصویر آنالیز XRD نانوذرات اکسید آهن ۳۸
شکل (۳-۲) تصویر آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی(FESEM) نانوذرات اکسید آهن ۳۹
شکل (۳-۳) دستگاه آنالیز حرارتی نانوسیالات ۴۱
شکل (۳-۴)(قسمت هایی از دستگاه شامل test section و data logger ۴۲
شکل (۳-۵) شکل شماتیک از محل قرار گیری سنسورها روی قسمت اصلی آزمایش ۴۴
شکل (۳-۶) مقطع فرضی ایجاد شده حول هر سنسور برای محاسبه دمای خروجی از مقطع ۴۵
شکل (۳-۷) عدد پرانتل روغن ترانسفورماتور در گستره دمایی مختلف [Karni, 1989] ۴۶
شکل (۳-۸)(دستگاه اندازه‌گیری ولتاژ شکست AC ۴۸

شکل (۳-۹) الکترودهای کروی غوطه‌ور در روغن برای انجام تست ولتاژ شکست..... ۴۸
شکل (۳-۱۰) ست آپ تجربی تولید و اندازه‌گیری ولتاژ شکست ضربه (آزمایشگاه فشارقوی دانشگاه زنجان)..... ۴۹
شکل (۳-۱۱) شکل شماتیک مدار تولید ولتاژ شکست ضربه..... ۵۰
شکل (۴-۱) ولتاژ شکست ضربه روغن پایه..... ۵۳
شکل (۴-۲) ولتاژ شکست ضربه نانوروغن با غلظت ۰.۳٪..... ۵۴
شکل (۴-۳) میانگین ضریب انتقال حرارت در طول لوله برای سنسورهای دهگانه تعبیه شده روی test section برای نمونه های مختلف در شار حرارتی ۴۰ وات..... ۵۵
شکل (۴-۴) میانگین ضریب انتقال حرارت در طول لوله برای سنسورهای دهگانه تعبیه شده روی test section در شار حرارتی ۱۰۰ وات..... ۵۶
شکل (۵-۱) اولین اختراع ثبت شده در حوزت نانوروغن ترانسفورماتور توسط سگال در سال ۱۹۹۹ ..... ۶۲
شکل (۵-۲) نمونه ای از اختراعات اخیر در حوزه نانوروغن ترانسفورماتور توسط یین در سال ۲۰۱۳ ..... ۶۳

فهرست جداول

جدول (۱-۱(ولتاژ شکست ضربه نانو روغن و روغن پایه برحسب قرار گیری محل سوزن [Segal, 1998] ۵
جدول (۱-۲) تاثیر رطوبت بر ولتاژ شکست نانو روغن و روغن پایه در پژوهش سگال [Segal, 1998] ۵
جدول (۳-۱) لزجت دینامیکی روغن ترانسفورماتور در دماهای مختلف..... ۴۶
جدول (۴-۱) ولتاژ شکست AC نانوروغن در غلظت‌های مختلف نانوذرات ۵۲
جدول (۴-۲) ولتاژ شکست ضربه برای روغن پایه و نانوروغن در غلظت‌های مختلف نانوذرات..... ۵۳
جدول (۴-۳) گرمای جذب شده و عدد رینولدز برای نمونه‌های مختلف در شارهای حرارتی متغیر ۵۷
جدول (۴-۴(آنالیز عدم قطعیت پارامترها و تجهیزات مختلف..... ۵۸

فهرست علائم اختصاری

ρ	چگالی	Pr	عدد پرانتل
a	ثابت لتیس	C_p	ظرفیت گرمایی ویژه
v	سرعت متوسط سیال	D	پارامتر نفوذ ذره
H	ضریب انتقال حرارت همرفت	K_B	ثابت بولتزمن
D	قطر داخلی لوله	T	دما
P	معرف نانوذرات	τ_D	زمان لازم برای انتقال ذره
φ	نسبت حجمی نانوذرات	τ_H	زمان لازم برای انتقال گرما
w	نسبت وزنی نانوذرات	X	رسانایی ترمومتریک
μ	ویسکوزیته دینامیکی	L	میانگین طول مسیر فونون
K	رسانایی حرارتی	T_m	نقطه ذوب
Nf	معرف نانوسیال	γ	ثابت گرونیزن
β	نسبت ضخامت لایه های نانوذرات به قطر نانوذرات	δ_t	ضخامت لایه مرزی حرارتی
Bf	معرف سیال پایه	q''	شار حرارتی اعمال شده به دیواره لوله
Re	عدد رینولدز	A	مساحت سطح مقطع داخلی لوله
T_f	دمای سیال درون لوله	V_N	حجم نانوسیال
T_w	دمای سطح لوله	V_O	حجم روغن
T_{in}	دمای سیال ورودی به لوله		

فصل ۱:

مقدمه و پیشینه پژوهش

۱-۱- مقدمه

ترانسفورماتورها یکی از تجهیزات مهم و گران قیمت در توزیع برق می باشند که عملکرد بهینه و مناسب آنها به عوامل بسیاری وابسته می باشد. روغن بعنوان یکی از حیاتی ترین اجزای ترانسفورماتور، دو وظیفه اساسی بر عهده دارد: اول اینکه بعنوان عایق الکتریکی بین سیم پیچ ها و بدنه عمل می نماید و ثانیاً حرارت ایجاد شده در قسمتهای برقدار ترانسفورماتور را به خارج منتقل می کند. با ولتاژ های بالایی که هم اکنون در شبکه انتقال انرژی صورت می گیرد نیاز به روغن ترانسفورماتور ها بعنوان عایق الکتریکی و وسیله خنک کننده افزایش یافته است. این تجهیزات با مشکلات عملکردی عدیده‌ای روبرو هستند که عمده این مشکلات بصورت مستقیم یا غیر مستقیم متوجه روغن آن می‌باشد. روغن یکی از حیاتی ترین قسمت‌های ترانسفورماتور می‌باشد که می‌بایست هردو وظیفه خنک‌کاری ترانسفورماتور و عایق‌کاری الکتریسیته با بدنه را در حد ایده‌آل انجام دهد؛ اما به دلیل رسانایی پایین حرارتی روغن‌های معدنی، ترانسفورماتور قادر به ارائه عملکرد بهینه نمی‌باشند. در این میان عواملی مانند افزایش غیر متعارف دمای محیط در فصول گرم، گرفتن بار بیش از حد(overloading)، اتصال کوتاه و ... باعث وارد آمدن آسیب های جدی به ترانسفورماتور می گردد. از دیگر معایب روغن ترانسفورماتور پیری و تولید ترکیبات اکسید شده می باشد. عواملی مانند رطوبت ، اکسیژن، میدان های مغناطیسی بالا و دما موجب تشدید فرایند اکسیداسیون می گردند که به منظور کاهش این فرایند می بایست عوامل مذکور را حذف یا کاهش داد و یا اینکه از ترکیبات ضد اکسیداسیون در روغن استفاده نمود. روغن مورد مطالعه در این تحقیق روغن Nytro Libra از نوع عاری از مواد افزودنی (uninhibited) محصول شرکت نیناس(nynas) می باشد که با وجود اینکه از روغن های خوب و پرمصرف در صنعت ترانسفورماتور در دنیا می باشد؛ ولی مشکلات ذکر شده در بالا را دارد.

خرابی عایقی ترانسفورماتورها تابعی از دما، رطوبت و اکسیژن موجود در محفظه‌ی ترانس می‌باشد. با تکنولوژی حاضر می‌توان تاثیر عوامل دوم و سوم را با آب‌بندی مناسب محفظه‌ی ترانس کاهش داد

اما همچنان عامل دما تهدید کننده‌ی اصلی عمر ترانسفورماتورها بوده و نباید از حد معینی تجاوز کند. با توجه به عدم توزیع یکنواخت دما درون ترانسفورماتورها، قسمتی از سیم‌پیچ و عایق که در معرض حداکثر دماست در خطر بیشترین تخریب قرار دارد. شواهد تجربی نشان می‌دهد که عمر عایقی ترانسفورماتورها با افزایش دمای نقطه‌ی داغ موضعی از حد مجاز، به طور چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده لزوم خنک‌کاری مفید و پربازده درون ترانسفورماتور احساس می‌شود.

تلاش‌های بسیاری تاکنون توسط تولید کنندگان روغن ترانسفورماتور برای بهبود خواص عایقی، خنک‌کاری، ساختاری و سایر خواص روغن انجام شده است که از آن جمله می‌توان به ساخت مواد مکمل افزودنی[1] و همچنین تولید روغن‌های دارای مواد آنتی اکسیدان موسوم به روغن‌های (inhibited) برای کاهش رسوب گذاری و تشکیل لجن و کثافات و افزایش عمر روغن، اشاره کرد. این روغن‌ها با وجود بهبود ساختار آنها هنوز در بحث خنک‌کاری دارای نقصان بودند. باید به این نکته نیز اشاره کرد که برخی از کشورها همچون ایران هنوز از روغن‌های معمولی ترانسفورماتور (بدون مواد افزودنی) استفاده می‌کنند.

۱-۲- پیشینه پژوهش

ایده استفاده از نانوذرات به منظور بهبود خواص مواد، بویژه خاصیت خنک‌کاری در سال‌های اخیر مورد توجه محققان بوده است. پژوهش‌های انجام یافته در حوزه نانوسیالات خنک‌کار را می‌توان به بخش‌های زیر تقسیم نمود:

۱) استفاده از نانوذرات مختلف از نظر فرمول شیمیایی
۲) بررسی اثر گذاری نانوذرات در شکل‌های ساختاری مختلف
۳) بررسی میزان پایداری نانوذرات درون محیط سیال در حضور مواد پایدارکننده مختلف
۴) استفاده از سیالات مختلف بعنوان سیال پایه مخنلف

[1] additive

در ادامه به تعدادی از این پژوهش‌ها اشاره می‌شود. ایستمن و همکارانش [Eastman, 2001] با افزودن نانوذرات مس به روغن پمپ با اندازه ذرات ۳۵ نانومتر و درصد حجمی ۰.۰۵۵٪ شاهد افزایش ۴۵٪ در رسانایی حرارتی روغن شدند. وانگ[1] و همکارانش [Wang, 1999] با افزودن نانوذرات آلومینا(Al_2O_3) با میانگین اندازه ذرات ۲۸ نانومتر و غلظت ۷.۵٪ درون روغن موتور شاهد افزایش ۳۰ درصدی در رسانایی حرارتی روغن شدند. چوی و همکارانش [Choi, 2008] با افزودن نانوذرات آلومینا و آلومینیوم نیترید(AlN) درون روغن ترانسفورماتور با غلظت حجمی ۰.۵٪ به افزایش ۸٪ در رسانایی حرارتی روغن و افزایش ۲۰٪ در ضریب انتقال حرارت کلی رسیدند. ژوان و همکارانش [Xuan, 2000] با افزودن نانوذرات مس با غلظت ۷.۵٪ و اندازه ذرات ۱۰۰ نانومتر به افزایش ۴۵٪ در رسانایی حرارتی روغن ترانسفورماتور رسیدند.

استفاده از نانوذرات درون روغن ترانسفورماتور برای بهبود خواص آن همواره با این دغدغه همراه بود که احتمال کاهش و یا تاثیر منفی نانوذرات روی سایر فاکتورهای روغن وجود دارد. به همین علت نانوذراتی که انتخاب شده و درون روغن استفاده می‌شود نباید باعث افت خواصی از جمله خاصیت عایقی روغن شود. علاوه بر این مورد، مشکل ته نشینی نانوذرات درون روغن نیز وجود دارد که باعث رسوب گذاری روی هسته شده و خرابی کاغذ عایق و همچنین کاهش عمر روغن در پی تشکیل لجن و کثافات را در پی خواهد داشت. از دیگر مشکلات قابل ذکر، احتمال تاثیرپذیری یا تاثیر گذاری نانوذرات روی سایر اجزای ترانسفورماتور بویژه قسمت‌های عایق جامد مانند کاغذ هسته می‌باشد. بنابر این محققان همواره در پژوهش‌های خود در حد امکان برای غلبه بر مشکلات ذکر شده تلاش کرده اند. ایده استفاده از نانوذرات در روغن ترانسفورماتورهای قدرت توسط سگال در سال ۱۹۹۸ مطرح شد [Segal, 1998]. وی در اولین کارش تغییرات خاصیت عایقی روغن ترانسفورماتور را با افزودن نانو ذرات مغناطیسی اکسید آهن به آن مطالعه کرد. بدین منظور دو فاکتور ولتاژ شکست (AC) بر اساس استاندارد ASTM D877 (فاصله الکترودها=mm ۲۵.۴) و ولتاژ شکست ضربه بر اساس استاندارد ASTM D3300 (فاصله الکترودها=mm ۸.۲۵) مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایشات وی حاکی از نزدیک بودن ولتاژ شکست (AC) نانو روغن و روغن پایه بود. در مورد ولتاژ

[1] Wang

شکست ضربه نیز وی دریافت، تخلیه الکتریکی که از قطب مثبت و از سمت ولتاژ پایین شروع می شوند(سوزن در قطب مثبت باشد) آثار مخربی دارد و استقامت روغن پایین خواهد بود بطوریکه استقامت روغن نصف حالتی خواهد بود که سوزن درقطب منفی باشد. پس از افزودن نانوذرات به روغن، ولتاژ شکست ضربه ۵۰٪ رشد داشته و در هر دو حالت (سوزن در قطب مثبت و منفی) مقداری برابر داشت. این نتایج در جدول (۱-۱) مشخص می باشد.

جدول (۱-۱) ولتاژ شکست ضربه نانو روغن و روغن پایه برحسب قرار گیری محل سوزن [Segal, 1998]

	ولتاژ شکست (kv)	
سیال عامل	قطب مثبت	قطب منفی
روغن پایه	۸۶	۱۷۰
نانو روغن	۱۵۷	۱۵۴

سگال همچنین با مقایسه ولتاژ شکست نمونه هایی از روغن پایه و نانو روغن با میزان رطوبت مساوی به تاثیر کم رطوبت بر ولتاژ شکست نانو روغن در مقایسه با روغن پایه دست یافت. این نتایج در جدول (۱-۲) آورده شده است.

جدول (۱-۲) تاثیر رطوبت بر ولتاژ شکست نانو روغن و روغن پایه در پژوهش سگال[Segal, 1998]

سیال	میزان رطوبت در روغن(PPM)			
	<۵	۲۰-۱۰	۳۰-۲۰	۳۰<
	ولتاژ شکست(KV)	ولتاژ شکست(KV)	ولتاژ شکست(KV)	ولتاژ شکست(KV)
روغن پایه	۵۰	۴۳	۳۷	۲۸
نانو روغن	۵۰	۴۷	۴۴	۴۰

همچنین او در پژوهش بعدی خود نانو روغن را تحت آزمایش آنالیز حرارتی قرار داد [Segal, 1999]. وی برای تهیه نانو روغن خود مقادیری از فروفلوید(نانوسیال مغناطیسی) با اشباع مغناطیسی بالای ۲۰۰ گاوس را درون روغن حاوی مواد آنتی اکسیدان (inhibited) مخلوط کرد. به منظور آنالیز حرارتی، دو لیتر از روغن پایه و نانوروغن به همراه سیم‌های مسی ، کاغذ عایقی و هسته فولادی(۱۰۰ گرم از هرکدام) به مدت ۲۸ روز در دمای $^{\circ}C$ ۱۵۰ قرار گرفت؛ سپس براساس استاندارد ASTM

D2440 تحت تست اکسیداسیون قرار گرفت. پس از آنالیز حرارتی مشاهده شد اشباع مغناطیسی، فروگیری اولیه و مقاومت الکتریکی نانو روغن(در مقایسه با روغن پایه) افزایش و ویسکوزیته به مقدار جزیی کاهش یافته است. بجز افزایش جزیی در اندازه ذرات نانو روغن، سایر خواص فیزیکی تغییر چندانی نداشته اند. مواد جامد عایقی مانند سیم‌های مسی و... از لحاظ ظاهری و خواص عایقی تغییراتی مشاهده نشد. میزان اکسیداسیون نیز در نانو روغن کمتر از روغن پایه در تست آنالیز حرارتی بود. از این پژوهش وی نتیجه گرفت هردوی روغن ها(روغن پایه و نانو روغن) برای سرویس های طولانی در ترانسفورماتور مناسب می باشند.

سگال در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۰ جنبه های دیگری از نانو روغن را بررسی نمود [Segal, 2000]. وی تاثیر گذاری و تاثیرپذیری نانو سیال را در برخورد با مواد جامد عایقی مورد مطالعه قرار داد. همانطور که قبلا نیز اشاره شد به منظور ایمنی بیشتر و بهره برداری حداکثری از ترانسفورماتور، در کنار روغن؛ بر حسب نیاز مواد جامد عایقی مانند کاغذ سلولزی و چوبک هسته و پرس بورد[1] در اطراف هسته قرار می گیرند تا عملکرد عایقی در ترانسفورماتور بهبود یابد. این مواد جامد همراه با هسته و سیم پیچ درون روغن غوطه ور می باشند. لزوم عدم تاثیر گذاری یا تاثیر پذیری از مواد جامد عایقی مانند واکنش دادن یا ایجاد خوردگی، کاملا مشخص است. نکته مهم تر اینکه نباید مواد جامد عایقی باعث جذب و ته نشینی بیشتر نانوذرات روی خود (مواد جامد عایقی) گردد. سگال با انجام این پژوهش نشان داد کاغذ هسته در صورت آغشته شدن به نانوروغن دارای نانوذرات مغناطیسی خاصیت خود را حفظ می‌کند. بعبارت دیگر نانو روغن تاثیر منفی روی سایر قطعات عایقی ندارد.

وی همچنین با طراحی یک نمونه ترانسفورماتور آزمایشگاهی و قرار دادن نانو روغن درون آن ملاحظه نمود، که در شرایط میدان مغناطیسی ترانسفورماتور؛ نانو روغن، خواص فیزیکی و مغناطیسی خود را حفظ می کند.

کاپکانسکی و همکارانش [Kopčanský, 2005] با استفاده از نانوذرات Fe_3O_4 با قطر متوسط nm ۱۰.۲ درون روغن ترانسفورماتور به مطالعه مسائلی همچون تاثیر میدان مغناطیسی بر خاصیت عایقی نانو روغن و یافتن غلظت بهینه نانوذرات درون روغن پرداخت. وی غلظت بهینه ۰.۰۱ را برای حفظ

[1] pressboard

خاصیت عایقی نانو روغن در ولتاژ های بالا معرفی می کند. وی این مساله را نیز عنوان می کند که در صورتی که میدان مغناطیسی عمود بر جهت جریان باشد ولتاژ شکست (DC) افزایش می یابد و در صورتی که میدان های مغناطیسی و الکتریکی هم جهت باشند، باعث توده شدن و بهم چسبیدن ذرات شده و شکست عایقی زودتر اتفاق می افتد.

کودلسیک و همکارانش [Kudelcik, 2010] برای ذرات با قطر متوسط ۱۰.۶ nm که با اولیک اسید[1] به عنوان پایدارساز[2] پوشش داده شده و درون روغن ترانسفورماتور ITO 100 پخش شده بودند غلظت ۱٪ و ۰.۲٪ را به عنوان بهترین غلظت برای حفظ خاصیت عایقی روغن معرفی کرده و غلظت های بالای ۲٪ را نامناسب می داند.

گیون و همکارانش [Given, 2011] با مطالعه روی تغییرات ولتاژ شکست DC و ضربه براساس قطب (مثبت یا منفی) برای ۳ نوع سیال عایقی شامل روغن ترانسفورماتور، استر[3] و سیال عایقی تسو[4] به افزایش ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور و استر در حضور نانوذرات مغناطیسی رسیدند. محدوده غلظتی مورد آزمایش وی از $\mu gr/ml$ ۲۰۰ تا $\mu gr/ml$ ۵۰۰ را شامل می‌شد. وی مشاهده کرد که برای هردو ولتاژ شکست، تخلیه الکتریکی که از قطب مثبت شروع می شوند دارای ولتاژ شکست پایینتری هستند (روغن زودتر تسلیم می‌شود).

گیون دو دلیل برای افزایش ولتاژ شکست روغن در حضور نانوذرات مغناطیسی بیان می کند: اول اینکه نانوذرات در روغن به عنوان رباینده الکترون بین ۲ الکترود عمل می کند و باعث کاهش سرعت آنها شده و شکست را به تاخیر می اندازد؛ ثانیا در وقوع پدیده شکست،افزایش دما در مناطقی که میدان های قوی الکتریکی وجود دارد باعث بخار شدن و تشکیل حباب شده و موجب حرکت الکترون ها از میان این مناطق می شود. نانوذرات از تشکیل این حباب‌ها جلوگیری کرده و مانع شکست می شوند.

لی و همکارانش [Lee, 2012] ولتاژ شکست نانو روغن با ذرات مغناطیسی را طبق استاندارد IEC

[1] Oleic acid
[2] Surfactant
[3] ester
[4] THESO