جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴
ص۱۳۳-۱۴۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۵/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۷

پتانسیل کاربرد روغن کانولا در ساخت کاغذ دی‌الکتریک با استفاده از خمیرکاغذ رنگ‌بری‌نشدهٔ باگاس

❖ **کژال مرادیان گیلان؛** کارشناس‌ارشد صنایع خمیر و کاغذ، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
❖ **محمد آزادفلاح*؛** استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
❖ **امیرعباس شایگانی اکمل؛** استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران
❖ **علی عبدلخانی؛** دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

چکیده

عایق روغن- کاغذ یکی از سیستم‌های عایق ترکیبی ارزان است که در ترانسفورماتورهای قدرت پُرشده با روغن از آن استفاده می‌شود. در این تحقیق خواص دی‌الکتریک و مقاومتی کاغذهای آغشته به روغن گیاهی کانولا و روغن معدنی مطالعه شده است. بدین منظور، کاغذهای دست‌ساز حاصل از خمیرکاغذ رنگ‌بری‌نشدهٔ سودای باگاس با دو سطح درجهٔ روانی ۴۰۰±۲۵ml و ۲۰۰±۲۵ ml ساخته شد. پس از خشک‌کردن کاغذها و رساندن آن‌ها به رطوبت حدود صفر، روغن‌ها خشک و گاززدایی شدند. سپس، فرایند آغشته‌سازی با اعمال همزمان حرارت و خلأ انجام شد. در نهایت، کاغذهای آغشته به روغن برای ارزیابی خواص مقاومتی و دی‌الکتریک- شامل مقاومت به کشش، ظرفیت، مقاومت عایقی، ضریب تلفات، و ولتاژ شکست دی‌الکتریک- آزمایش شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پالایشْ اثر افزایشی بر خواص دی‌الکتریک مثل ظرفیت و ثابت دی‌الکتریک دارد و شاخص مقاومت به کشش بهبود پیدا کرده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، کاغذهای آغشته به روغن گیاهی- صرف‌نظر از مقاومت عایقی پایین‌تر و ضریب تانژانت تلفات بالاتر- از نظر سایر خواص دی‌الکتریک، مثل ظرفیت، ثابت دی‌الکتریک، و ولتاژ شکست، عملکرد بهتری نسبت به کاغذهای آغشته به روغن معدنی دارند.

واژگان کلیدی: خمیرکاغذ باگاس، درجهٔ روانی، روغن گیاهی کانولا، روغن معدنی، کاغذ دی‌الکتریک.

* نویسندهٔ مسئول تلفن: ۰۲۶۳۲۲۴۹۳۱۱ فاکس: ۰۲۶۳۲۲۴۹۳۱۱
Email: adfallah@ut.ac.ir

مقدمه

عایق سلولزی یکی از ارزان‌ترین و پُرکاربردترین مواد عایق به‌کاررفته در ترانسفورماتورهای قدرت شناخته شده است. برای عملکرد مطمئن ترانسفورماتورهای قدرت ولتاژ بالا، ضروری است ساختارهای عایقِ سلولزیِ به‌کاررفته در ساختمانشان کاملاً با روغن آغشته شود. عایق سلولزی به‌کاررفته در ترانسفورماتورِ قدرت شامل کاغذ، پرس‌بورد، و بلوک‌های پرس‌بورد لایه‌ای ضخیم است که از الیاف چوبی پالایش‌شده- که معمولاً کرافت الیاف بلند است- ساخته می‌شود و بین این الیاف فضاهای خالی حاوی هوا وجود دارد. اگرچه هوای بین الیاف بسیار اندک است، مقدار قابل توجهی از حجم درون مادهٔ عایق جامد را اشغال می‌کند. سلولز، به طور استثنایی، دارای ثابت دی‌الکتریک[1] بالایی است. با وجود این، ثابت دی‌الکتریک کاغذ بسیار پایین است. این امر به علت درصد زیاد حفره‌های هوا و منافذ درون کاغذ است. هوا ثابت دی‌الکتریک نسبتاً پایینی دارد و خاصیت عایقی کاغذ را پایین می‌آورد. بنابراین، برای بالابردن ثابت دی‌الکتریک ورقه‌های کاغذ آغشته‌سازی حفره‌های کاغذ با روغن‌ها و رزین‌ها و ... فناوری معمولی است. این مواد آغشته‌سازی دارای ثابت دی‌الکتریک بزرگ‌تری نسبت به هوا (ظرفیت القایی ویژهٔ بزرگ‌تر از هوا) هستند. روغن معدنی با این منظور برای سالیان بسیار با نتایج عالی به‌کار رفته است، اما روغن معدنی قابل احتراق (نقطهٔ اشتعال ۱۷۰ ^0C) است و آتش‌سوزی ترانسفورماتور گاهی اتفاق می‌افتد [۱].

اخیراً مایع عایق بر پایهٔ روغن گیاهی به‌دلیل داشتن خاصیت کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر و نقطهٔ اشتعال متجاوز از ۳۰۰ ^0C به‌عنوان جانشینی برای روغن عایق معدنی مطرح شده است [۲]. روغن‌های بر پایهٔ دانهٔ خوراکی منبع جالبی از استرهای طبیعی‌اند. این روغن‌های تولیدی کشاورزی و قابل کاربرد در مواد غذایی به‌طور وسیعی موجودند و برعکس روغن معدنی مشتقات منابع تجدیدپذیرند و برای تولید مواد فعال سطحی، روان‌کننده‌ها، مرکب‌ها، پوشش‌دهنده‌ها، و پلیمرها به‌کار می‌روند. این نوع جدید از روغن‌های عایق در صورتی می‌توانند در ترانسفورماتورهای قدرت به‌کار روند که در زمینهٔ خواص دی‌الکتریک آن‌ها در ترکیب با عایق سلولزی مطالعهٔ بیشتری صورت گیرد [۳].

در ابتدا، تشخیص داده شد که استرهای طبیعی بر پایهٔ دانه‌های روغنی برای استفاده در ترانسفورماتورها نامناسب‌اند، اما، استفاده‌های پیشین روغن کانولا در کاربردهای خازنی به پتانسیل درخور توجه آن اشاره می‌کند [۳]. این تشخیص تا حدی بدین سبب است که روغن‌های استری ویسکوزیتهٔ بالاتری نسبت به روغن‌های معدنی دارند و آغشته‌سازی مواد سلولزی با آن‌ها مشکل است. این امر به دیدگاهی منجر می‌شود که فرایندهای آغشته‌سازی به توسعهٔ بیشتری نیاز دارند. برای غلبه بر این مشکل، می‌توان ویسکوزیتهٔ روغن‌های استر را از طریق به‌کارگیریِ دمایی نسبتاً بالا تا سطح پایینِ قابلِ قبولی کم کرد. از این رو، مقاومت در برابر حرکت روغن درون سوراخ‌های مواد عایق جامد می‌تواند کاهش یابد [۴].

توسعه‌های اخیر در زمینهٔ بهبود خواص الکتریکی

1. Dielectric constant

روغن‌های عایق گیاهی موجب افزایش علاقه‌مندی به تحقیق دربارهٔ کاربرد روغن‌های گیاهی در عایق‌کنی کاغذ شده است [۲]. لیائو و همکاران ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی، دی‌الکتریک، و حرارتی پرس‌بورد آغشته به استر طبیعی و روغن معدنی را بررسی کردند. آن‌ها همچنین پدیدهٔ کهنه‌شدگی را در عایق‌های آغشته به استر طبیعی و روغن معدنی بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها این باور را تقویت کرد که می‌توان از استر طبیعی در ترانسفورماتورهای قدرت استفاده کرد [۵]. همچنین، دای و وانگ به مقایسهٔ آغشته‌سازی عایق‌های سلولزی با روغن استر و معدنی پرداختند. آن‌ها بیان کردند که روغن گیاهی به‌طور موفقیت‌آمیزی می‌تواند در ترانسفورماتورهای قدرت به‌کار برده شود و مشکل ویسکوزیتهٔ بالای استر و به دنبال آن عدم آغشته‌سازی مؤثر آن با افزایش دمای آغشته‌سازی حل‌شدنی است. آن‌ها این بررسی را در دامنهٔ دمایی ۲۰، ۴۰، و $۶۰^{0}C$ انجام دادند و بیان کردند که در صورت به‌کارگیری دمای بالاتر آغشته‌سازی برای روغن‌های استر درجهٔ آغشته‌سازی روغن می‌تواند به همان درجهٔ آغشته‌سازی روغن‌های معدنی برسد [۴]. مارتین و همکاران نیز دربارهٔ عایق سلولزی آغشته به استر در ترانسفورماتورهای قدرت مطالعه‌ای انجام دادند و آن را با عایق‌های سلولزی آغشته به روغن معدنی مقایسه کردند. آن‌ها مزیت استفاده از استرها را ثابت دی‌الکتریک بالاترشان بیان کردند و اذعان داشتند که در مقایسه با روغن معدنی تطابق بهتری با ثابت دی‌الکتریک سلولز آغشته‌شده ایجاد می‌کنند [۶]. جیان لی و همکاران ویژگی‌های مهم فیزیکی- شیمیایی و الکتریکی یک نوع مایع دی‌الکتریک بر پایهٔ روغن کلزا[1] را بررسی کردند. آن‌ها همچنین عایق‌کاری کاغذ با روغن کلزا را با روغن معدنی ترانسفورماتور مقایسه کردند. نتیجهٔ تحلیل داده‌های آزمایش آن‌ها نشان داد که در دمای مشابه کاغذ آغشته به روغن کلزا ثابت دی‌الکتریک بالاتری از کاغذ آغشته به روغن معدنی دارد. آن‌ها دلیل این امر را ثابت دی‌الکتریک بیشتر روغن گیاهی نسبت به روغن معدنی بیان کردند [۲]. همچنین، همر و همکاران رفتار الکتریکی و دی‌الکتریکی عایق‌کنی پرس‌بورد با روغن کلزا به‌عنوان سیال آغشته‌سازی را بررسی کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که امکان استفاده از روغن کلزای دوستدار محیط زیست برای کاربردهای ترانسفورماتور وجود دارد و روغن کلزا سازش خوبی با پرس‌بورد ترانسفورماتور معمولی دارد، به‌ویژه اینکه ولتاژ شکست پرس‌بورد با این روغن به قدر کافی بالاست و از این دیدگاه می‌تواند مادهٔ آغشته‌ساز مناسبی برای استفاده در ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا باشد. آن‌ها همچنین بیان کردند که آغشته‌سازی با روغن کلزا نسبت به آغشته‌سازی با روغن معدنی به مقادیر بالاتر ثابت دی‌الکتریک پرس‌بورد منجر می‌شود [۷]. ایروان و سوارنو نیز خواص دی‌الکتریک عایق‌های آغشته به اختلاطی از درصدهای مختلف روغن معدنی و استر طبیعی (روغن خرما) را بررسی و مشاهده کردند که با افزایش میزان درصد استر در اختلاط ثابت دی‌الکتریک افزایش می‌یابد؛ به طوری که بیشترین ثابت دی‌الکتریک مربوط به آغشته‌سازی با ۱۰۰ درصد استر طبیعی بود. آن‌ها نیز دلیل این امر را ثابت دی‌الکتریک بالاتر روغن گیاهی نسبت به روغن

1. rapeseed oil

معدنی اعلام کردند [۸].

محسن و مبارک در آزمایش‌هایشان به بررسی پتانسیل استفاده از کاغذ حاصل از ساقهٔ پنبه به‌جای کاغذ سوزنی برگ پرداختند. آن‌ها خواص الکتریکی کاغذ ساقهٔ پنبهٔ آغشته به روغن بزرک را با کاغذ چوب سوزنی‌برگ مقایسه کردند و دریافتند که آغشته‌سازی کاغذ حاصل از ساقهٔ پنبه با روغن بزرک ثابت دی‌الکتریک را به مقدار زیادی بالا می‌برد. این امر برای هر دو نوع کاغذهای رنگ‌بری‌نشده و رنگ‌بری‌شده مشاهده شد [۹]. مرادیان و همکاران نیز به بررسی پتانسیل استفاده از خمیرکاغذ باگاس به عنوان جایگزینی برای خمیرکاغذهای کرافت در ساخت کاغذهای دی‌الکتریک پرداختند. آن‌ها در مقایسهٔ خود بیان کردند که خمیرکاغذ باگاس و مخلوط آن با کرافت به شرط گذراندن آزمون‌های پیرشدگی می‌تواند جایگزین مناسبی برای خمیرکاغذ کرافت باشد؛ این امر نشان‌دهندهٔ لزوم تحقیقات بیشتر در این زمینه است [۱۰].

در این بررسی، با توجه به وجود شرکت‌های مختلف فعال در زمینهٔ ساخت ترانسفورماتور در داخل کشور و استفاده از عایق‌های کاغذی غالباً وارداتی، در راستای توسعه و شناخت خواص مهم مرتبط با این نوع کاغذها، به ساخت کاغذهای دی‌الکتریک دست‌ساز از الیاف باگاس ـ به دلیل هزینهٔ پایین‌تر و دسترسی فراوان به آن ـ اقدام شد. به‌علاوه، پتانسیل استفاده از روغن گیاهی کانولا به عنوان عامل آغشته‌ساز در ساخت این نوع کاغذهای دی‌الکتریک مطالعه شد.

مواد و روش‌ها

الیاف استفاده‌شده برای ساخت کاغذهای دی‌الکتریک از نوع خمیرکاغذ رنگ‌بری‌نشدهٔ سودای باگاس با عدد کاپای ۸ است که از کارخانهٔ کاغذسازی پارس تهیه شد و به آزمایشگاه انتقال یافت. همچنین، روغن معدنی مورد نیاز برای آغشته‌سازی از کارخانهٔ ایران ترانسفوری تهیه شد. جدول ۱ خصوصیات روغن معدنی ترانسفورماتور را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خصوصیات روغن معدنی ترانسفورماتور

آزمایش	حد مجاز
ظاهر	شفاف، بدون رسوب و مواد معلق
دانسیته در 20^0C	۰/۸۹۵ gr/cm^3: حداکثر
ویسکوزیته در 40^0C	۱۶/۵ cst: حداکثر
نقطهٔ اشتعال	۱۴۰°C: حداقل
ارزش خنثایی	۰٫۰۳ mg KOH/g oil: حداکثر
ولتاژ شکست بعد از تیمار	۵۰ KV: حداقل
ضریب اتلاف در 90^0C دی‌الکتریک	۰٫۰۰۵: حداکثر
نقطهٔ ریزش	≤ -۳۰°C
سولفور خورنده	بدون مادهٔ خورنده
پایداری در برابر اکسیداسیون	
ارزش خنثایی	≤۰/۴ mg KOH/g oil
درصد رسوب	≤۰/۱ % by mass
مراجع استاندارد	R-5121-055, IEC 296, ISO 3675, DIN 51562, ISO 2719, DIN 51558, IEC 156, IEC 247, ISO 3016, DIN 51353, ISO 5662, DIN 51558, IEC 1125

روغن گیاهی تصفیه‌شدهٔ کانولا هم از کارخانهٔ اویلا خریداری شد. جدول ۲ ترکیبات این محصول را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ترکیبات روغن کانولای اویلا (در ۱۰۰ گرم)

عنوان	نوع	مقدار
کلسترول	–	۰
سدیم	–	
کربوهیدارت	–	۰
پروتئین	–	۰
موم	–	۰
اسید چرب اشباع	–	۶٫۳ ـ ۷ گرم
اسید اولئیک	تک غیراشباع، امگا-۹	۵۸ ـ ۶۵ گرم
اسید لینولئیک	دو غیراشباع، امگا-۶	۱۷ ـ ۲۱ گرم
اسید لینولنیک	سه غیراشباع، امگا-۳	۸٫۲ ـ ۹٫۶گرم

پالایش نهایی خمیرکاغذهای باگاس طبق آیین‌نامهٔ شمارهٔ T۲۴۸sp-۰۸ استاندارد TAPPI به وسیلهٔ پالایشگر PFI Mill تا دو سطح درجهٔ روانی ۲۰۰±۲۵ ml, CSF و ۴۰۰±۲۵ ml, CSF انجام شد. کاغذهای دست‌ساز ۶۰ گرمی مطابق آیین‌نامهٔ شمارهٔ T۲۰۵ sp-۹۵ استاندارد TAPPI از خمیرکاغذهای باگاس ساخته شد. گاززدایی، خشک‌کردن روغن‌ها، و کاهش ویسکوزیته از طریق اعمال توأم خلأ و حرارت انجام شد. به‌علاوه، رطوبت نمونه‌های کاغذ از طریق حرارت‌دهی در دمای ۷۰ ^{0}C و اعمال خلأ به حدود صفر رسانده شد. در پایان مرحلهٔ خشک کردن کاغذها، روغن معدنی و روغن گیاهی هر یک جداگانه به سیستم حاوی کاغذهای خشک‌شده تزریق شد. پس از آغشته‌سازی، نمونه‌ها به مدت دو ساعت در دمای ۹۰ ^{0}C تحت خلأ قرار داده شد تا روغن کاملاً به درون حفره‌های کاغذ نفوذ کند. در پایان، نمونه‌ها به مدت دوازده ساعت در درون آون در دمای ۷۰ ^{0}C قرار داده شد تا فرایند آغشته‌سازی به‌خوبی تکمیل شود. وزن نمونه‌ها پیش و پس از آغشته‌سازی اندازه‌گیری شد تا میزان جذب روغن توسط نمونه‌ها محاسبه شود. میانگین جذب روغن در نمونه‌ها ۳۰٫۰۳ درصد تعیین شد. سپس، نمونه‌های آغشته‌شده به منظور تعیین خواص دی‌الکتریک در ظرف‌هایی دربسته حاوی روغن قرار گرفت. خواص دی‌الکتریک اندازه‌گیری‌شده و توضیحات مختصر دربارهٔ آن‌ها در پی می‌آید:

ظرفیت

خازن عنصری الکتریکی و شامل دو هادی است که به وسیلهٔ یک عایق از یکدیگر جدا شده‌اند. ظرفیت یک خازن نسبت بین باری که بر روی یکی از هادی‌ها (جوشن‌ها) قرار گرفته است Q به اختلاف پتانسیل آن دو هادی U تعریف می‌شود:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (۱)$$

بُعد واحد ظرفیت کولن بر ولت (C/V) است. در صورتی که بار الکتریکی را به کولن (C) و اختلاف سطح را به ولت (V) بسنجیم، واحد ظرفیت را فاراد می‌گویند و با F نشان می‌دهند [۱۱]. یک نارسانای الکتریکی یا عایق معمولاً از طریق تأثیر بر میزان اختلاف پتانسیل، U، بر ظرفیت خازن اثر می‌گذارد. به همین دلیل، ظرفیت خازن به عنوان معیاری از عملکرد عایق‌های سلولزی ساخته‌شده اندازه‌گیری شده است.

تانژانت تلفات

نسبت جریان اهمی (I_R) به جریان خازنی (I_C) در یک خازن را برای ولتاژ متناوب ضریب تلفات دی‌الکتریک گویند و با tanδ نمایش می‌دهند [۱۲].

آزمون‌های ظرفیت و تانژانت تلفات با کمک دستگاه SOKEN (شکل ۱) در دمای ^{0}۲۰C و ولتاژ ۳۷۰ ولت مطابق با استاندارد ASTM D 150 اندازه‌گیری شد.

شکل ۱. آزمونگر SOKEN

ثابت دی‌الکتریک

نسبت ظرفیت الکتریکی یک خازن پُرشده با عایق (C) به ظرفیت خلأ (C_0) مقیاسی از پلاریزاسیون عایق است و معمولاً ثابت دی‌الکتریک (k) یا همان پرمی‌تیویته نسبی (ε.) نامیده می‌شود. در واقع، ثابت دی‌الکتریک تعیین می‌کند که یک ماده چقدر می‌تواند صفحات یک خازن را از نظر الکتریکی از هم جدا کند. برای درک خواص دی‌الکتریک کاغذ، بررسی فاکتورهایی که روی ثابت دی‌الکتریک مواد تأثیرگذارند مهم است [۱۲]. رابطهٔ ($C = \varepsilon A/d$) به‌خوبی عوامل مؤثر بر ظرفیت یک خازن را نشان می‌دهد. این عوامل شامل ضخامت بین صفحات خازن (ضخامت کاغذ، d)، سطح مقطع صفحات (A)، و نوع دی‌الکتریک (ε) است [۱۲]. عمل پالایش اغلب با اهداف بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی کاغذ، کنترل زه‌کشی کاغذ، و بهبود شکل‌گیری کاغذها انجام می‌شود. در واقع، پالایش یک سری تغییرات در الیاف به‌وجود می‌آورد که افزایش انعطاف‌پذیری، قابلیت لهیدگی، و سطح تماس الیاف را به‌همراه خواهد داشت [۱۳]. در نتیجه، کاهش ضخامت کاغذِ حاصل از عمل پالایش همراه با افزایش دانسیته و کاهش میزان تخلخل بهبود کیفیت دی‌الکتریک و ظرفیت را به‌همراه دارد. به‌علاوه، با افزایش سطح تماس، میزان پیوندهای هیدروژنی بیشتر می‌شود و به‌دنبال آن پلاریزاسیون افزایش می‌یابد. از آنجا که نسبت ظرفیت الکتریکی یک خازن پُرشده با عایق (c) به ظرفیت خلأ (c_0) مقیاسی از پلاریزاسیون عایق است و معمولاً ثابت دی‌الکتریک (k) یا همان پرمی‌تیویتهٔ نسبی نامیده می‌شود، به افزایش ثابت دی‌الکتریک منجر می‌شود [۱۴]. از طرفی، ثابت دی‌الکتریک و ظرفیت نسبتی مستقیم با هم دارند، پس ظرفیت افزایش می‌یابد [۱۲].

مقاومت عایقی

آزمون مقاومت عایقی به‌منظور اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی عایق انجام می‌شود. عایق خوب معمولاً مقاومتی در حد مگا اهم یا محدوده‌های بالاتر دارد. در واقع، مقاومت عایقی نسبت بین ولتاژ و جریان در پایان یک دقیقه از آزمایش است. این پارامتر حاوی اطلاعات مستقیمی از سیستم دی‌الکتریک است، اما به‌شدت تحت تأثیر دماست. مقاومت عایقی (R) با مقاومت ویژه (ρ) رابطهٔ مستقیم دارد و با افزایش آن مقاومت ویژه افزایش می‌یابد.

$$\rho = \frac{R.A}{t} \qquad (۲)$$

در این معادله ρ مقاومت ویژه، R مقاومت عایقی، A مساحت سطح، و t ضخامت است [۱۲]. آزمون مقاومت عایقی هم در همان دما با کمک دستگاه مِگِر در ولتاژ ۲۵۰۰ ولت انجام شد.

ولتاژ شکست دی‌الکتریک

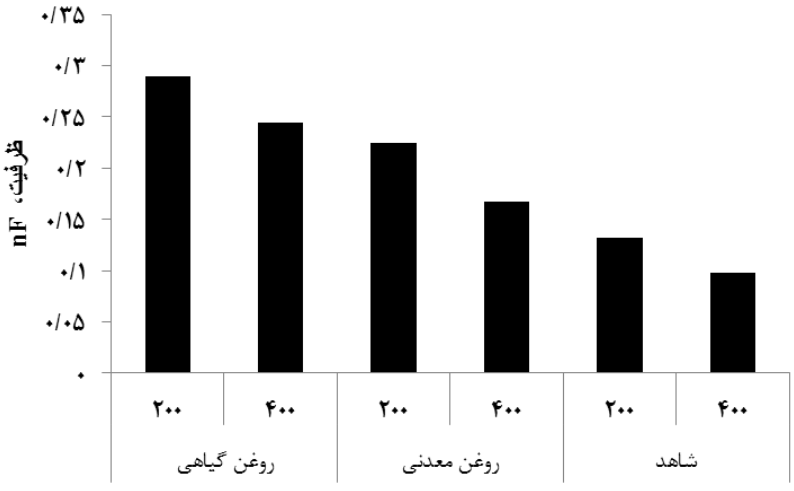
آزمایش ولتاژ شکست دی‌الکتریک با کمک یک الکترود کروی به قطر ۱ سانتی‌متر و یک الکترود استوانه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. الکترودهای به‌کاررفته در آزمایش مطابق استاندارد ASTM D 149می‌توانند به شکل‌های مختلف باشند.

به‌منظور اندازه‌گیری خواص مقاومتی، نمونه‌های کاغذ عایق و شاهد مطابق آیین‌نامهٔ شمارهٔ ۹۶-T۲۲۰sp استاندارد TAPPI آماده‌سازی شد. سپس، مقاومت در برابر کشش نمونه‌ها براساس استاندارد TAPPI و مطابق با T۴۹۴om-۰۱ تعیین شد.

نتایج و بحث

ظرفیت

شکل ۲ میانگین ظرفیت کاغذهای دی‌الکتریک ساخته‌شده و نمونه‌های شاهد را با توجه به متغیرهای ساخت نشان می‌دهد. همان‌طورکه در شکل ۲ مشخص است، بیشترین میزان ظرفیت مربوط به کاغذهای آغشته به روغن گیاهی با درجهٔ روانی ۲۰۰ml است که نشان‌دهندهٔ اثر مثبت پالایش بر ظرفیت است. با نگاهی دیگر به نتایج، مشاهده می‌شود نمونه‌های آغشته به روغن گیاهی بیشترین ظرفیت را نسبت به سایر نمونه‌ها دارند.



شکل ۲. ظرفیت (nF) کاغذهای دی‌الکتریک دست‌ساز (اعداد محور افقی مربوط به درجهٔ روانی خمیرکاغذ است).

ثابت دی‌الکتریک (پرمی‌تیویتهٔ نسبی)

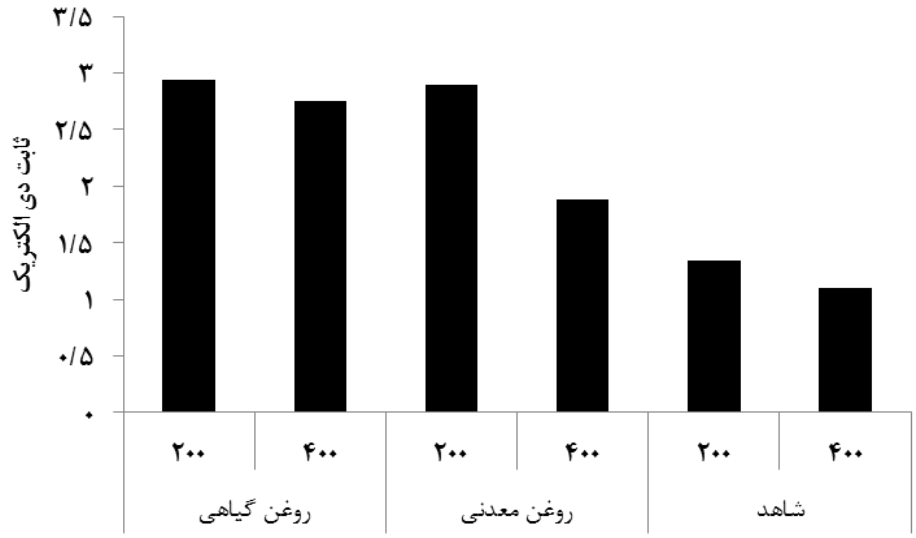
در این بررسی نتایج به‌دست‌آمده از ثابت دی‌الکتریک با نتایج ظرفیت همخوانی داشتند. شکل ۳ میانگین ثابت دی‌الکتریک کاغذهای دست‌ساز را نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین میزان ثابت دی‌الکتریک مربوط به کاغذهای آغشته به روغن گیاهی با درجهٔ روانی ۲۰۰ml است. اثر پالایش بر ثابت دی‌الکتریک در شکل به‌خوبی مشهود است؛ به‌طوری‌که کاغذهایی با درجهٔ روانی ۲۰۰ml دارای ثابت دی‌الکتریک بیشتری نسبت به کاغذهایی با درجهٔ روانی ۴۰۰ ml هستند.

همان‌طورکه قبلاً هم گفته شد، پالایش در اثر فیبریلاسیون الیاف موجب افزایش پیوندهای بین‌لیفی می‌شود. با ایجاد پیوندهای هیدروژنی میزان ثابت دی‌الکتریک افزایش می‌یابد. از طرفی، آغشته‌سازی با روغن گیاهی ثابت دی‌الکتریک بیشتری را نسبت به روغن‌های معدنی به دنبال دارد. در تحقیقات پیشین نیز ثابت دی‌الکتریک روغن گیاهی بیشتر از روغن معدنی گزارش شده است [۲، ۷، ۸].

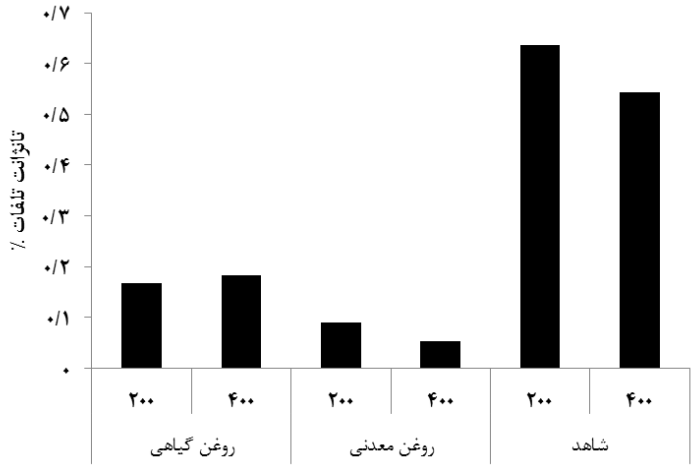
تانژانت تلفات

شکل ۴ مقادیر تانژانت تلفات اندازه‌گیری‌شده برای کاغذهای دست‌ساز را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، بیشترین تانژانت تلفات مربوط به نمونه‌های آغشته‌نشده و کمترین تلفات مربوط به نمونه‌های آغشته به روغن معدنی است.

طی آزمایش‌های همر و همکاران، برای مقایسهٔ روغن معدنی و روغن کلزا، ضریب تلفات عایقی روغن کلزا به مقدار چشمگیری بیشتر از روغن معدنی گزارش شد [۷]. همچنین، سوارنو و سوریا طی بررسی‌هایی در زمینهٔ اختلاط استر طبیعی (روغن خرما) با روغن معدنی، مشاهده کردند که استر طبیعی ۱۰۰ درصد بیشترین تانژانت تلفات و روغن معدنی کمترین تانژانت تلفات را دارد.



شکل ۳. میانگین ثابت دی‌الکتریک کاغذهای دست‌ساز



شکل ۴. میانگین تانژانت تلفات کاغذهای دی‌الکتریک دست‌ساز

آن‌ها بیان کردند این افزایش با افزایش دما از 20^0C تا $100\ ^0C$ بیشتر می‌شود. ضریب تلفات دی‌الکتریک متأثر از درجهٔ پلاریزاسیون روغن است [۸]. ساختار شیمیایی نشان می‌دهد که روغن معدنی ساختار متقارنی دارد، در حالی که استر طبیعی دارای ساختار نامتوازن[1] است. این ساختار نامتوازن موجب افزایش ضریب تلفات استر می‌شود. مقاومت دوقطبی‌ها در طول فرایند پلاریزاسیون موجب افزایش تلفات در روغن استر می‌شود [۸]. از طرفی، وجود آب در استر ضریب تلفات را افزایش می‌دهد. طی مطالعهٔ انجام‌شده بر روی کاغذهای کرافت آغشته به روغن معدنی و استر طبیعی توسط لیائو و همکاران، مشخص شد که مقدار آب کاغذهای کرافت آغشته به استر طبیعی به میزان زیادی بیشتر از روغن معدنی است. آن‌ها دلیل این امر را درجهٔ اشباع آب[2] بالاتر استر نسبت به روغن معدنی بیان کردند [۵].

مقاومت عایقی

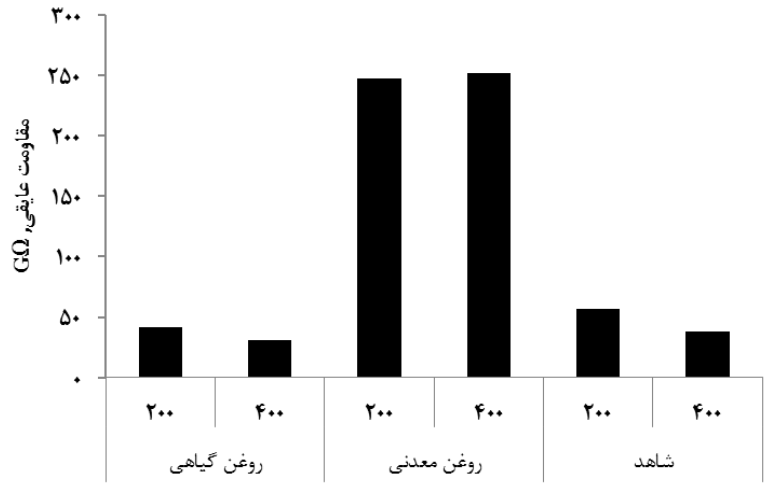
شکل ۵ مقاومت عایقی اندازه‌گیری‌شده برای کاغذهای دست‌ساز را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر میانگین‌ها، بیشترین مقاومت عایقی مربوط به نمونه‌های آغشته به روغن معدنی است.

طی بررسی خواص الکتریکی عایق کاغذی آغشته به روغن گیاهی (روغن کلزا) توسط همر و همکاران، مقاومت ویژهٔ نمونه‌های آغشته به روغن معدنی بیشتر از روغن کلزا گزارش شد. از آنجا که مقاومت ویژه و مقاومت عایقی با هم نسبت مستقیم دارند، نمونه‌های آغشته به روغن معدنی دارای مقاومت عایقی بالاتری هستند. از طرفی، مقاومت عایقی با افزایش اختلاف پتانسیل افزایش می‌یابد. پس، در نمونه‌هایی که ظرفیت بالاتری دارند میزان مقاومت عایقی کم است [۵].

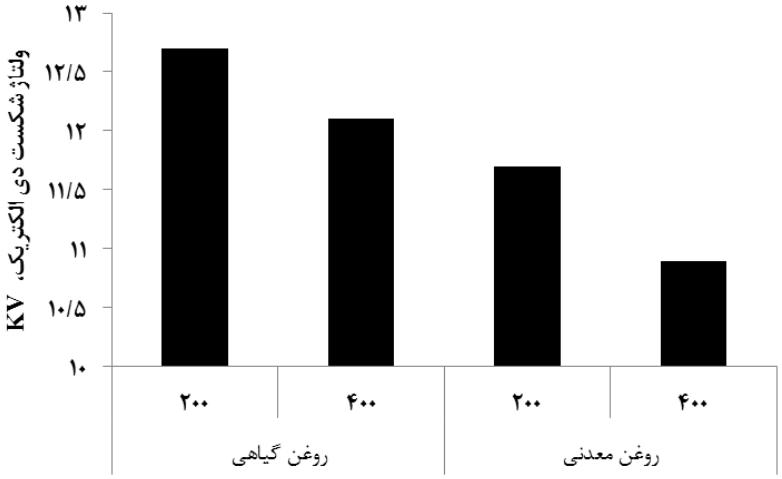
ولتاژ شکست دی‌الکتریک

شکل ۶ میانگین ولتاژ شکست دی‌الکتریک کاغذهای دست‌ساز را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، می‌توان مشاهده کرد که ولتاژ شکست دی‌الکتریک کاغذهای آغشته به روغن گیاهی بیشتر از کاغذهای آغشته به روغن معدنی است.

1. unbalance structure
2. water saturation



شکل ۵. میانگین مقاومت عایقی کاغذهای دی‌الکتریک دست‌ساز



شکل ۶. میانگین ولتاژ شکست دی‌الکتریک کاغذهای دست‌ساز

اکسایش روغن‌های معدنی آلودگی‌هایی را به شکل لجن آزاد می‌کند و این آلودگی‌ها ولتاژ شکست روغن‌ها را کاهش می‌دهند. این پدیده در استر مشاهده نمی‌شود. ولتاژ شکست همچنین به مقدار آب نسبی[1]، wt_r، بستگی دارد. افزایش میزان آب نسبی مقدار ولتاژ شکست را کاهش می‌دهد.

همان‌طورکه گفته شد، روغن گیاهی مقدار آب اشباع[2] بسیار زیادی نسبت به روغن معدنی دارد. بنابراین، استر قادر به حل آب بسیار زیادی در مقایسه با روغن معدنی به‌منظور رسیدن به همان مقدار آب نسبی است. در نتیجه، به‌طور معمول، روغن گیاهی مقدار آب نسبی پایینی دارد. به همین دلیل ولتاژ شکست استر طبیعی بالاتر از روغن معدنی است. مقدار آب

1. relative water content

2. saturation water content

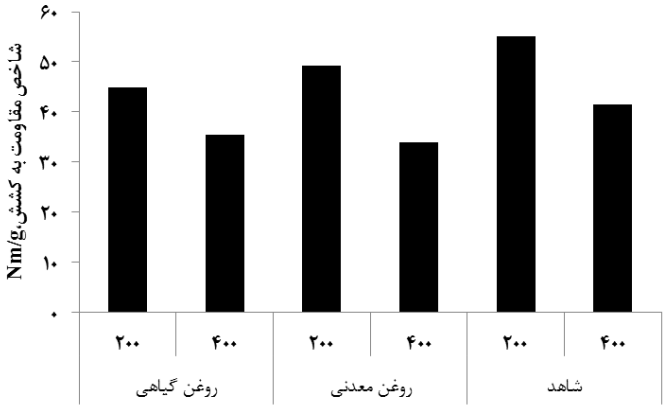
نسبی از معادلهٔ $wt_r = \frac{wt_{abs}}{wt_L} \times 100\%$ به‌دست می‌آید که در آن wt_{abs} مقدار مطلق آب و wt_L مقدار اشباع آب است. حد اشباع مایع عایق به نوع مایع عایق، ترکیب شیمیایی، و وزن مولکولی آن بستگی دارد [۸]. از طرفی، با توجه به نتایج، همان‌طورکه انتظار می‌رفت، نمونه‌هایی با درجهٔ روانی ۲۰۰ml دارای سطح ولتاژ شکست بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها بودند که نشان‌دهندهٔ اثر مثبت پالایش بر ولتاژ شکست دی‌الکتریک است. این امر را می‌توان ناشی از افزایش انسجام کاغذ و کاهش تخلخل کاغذ در اثر پالایش دانست.

مقاومت به کشش

شکل ۷ میانگین شاخص مقاومت به کشش کاغذهای دست‌ساز را نشان می‌دهد. همان‌طورکه انتظار می‌رود، با افزایش سطح پالایش، میزان شاخص مقاومت به کشش افزایش یافته است.

در واقع، با افزایش سطح پالایش درجهٔ روانی خمیر کاغذها کاهش می‌یابد و دلیل آن افزایش فیبریله‌شدن الیاف و افزایش نرمه‌هاست که به افزایش پیوندهای هیدروژنی منجر می‌شود. این افزایش پیوندهای بین‌لیفی باعث افزایش شاخص مقاومت به کشش می‌شود. افزایش سطوح تماس الیاف، افزایش تعداد پیوندهای بین‌لیفی، و افزایش نرمه‌ها در بهبود مقاومت به کشش کاغذهای حاصل مؤثر بوده‌اند. از آنجا که شدت و کیفیت اتصال بین الیاف مهم‌ترین عامل مؤثر بر مقاومت کششی است، این ویژگی با افزایش شدت پالایش افزایش می‌یابد [۱۵].

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۷، بیشترین مقدار شاخص مقاومت به کشش مربوط به کاغذهای شاهد با درجهٔ روانی ۲۰۰ml است و با آغشته‌سازی نمونه‌ها از میزان مقاومت به کشش آن‌ها اندکی کاسته شده است. با توجه به این امر که کاغذهای مورد آزمایش قبل و در حین آغشته‌سازی تحت حرارت ۷۰ و ۹۰ درجهٔ سلسیوس قرار گرفتند، شاید بتوان علت این پدیده را به پیشینهٔ حرارت‌دهی کاغذ و روغن نسبت داد. طی بررسی یان لی و همکاران بر روی سیسال[1] نیز مشخص شد که مقدار مقاومت به کشش الیاف این گیاه با اعمال دما کاهش می‌یابد [۱۶].



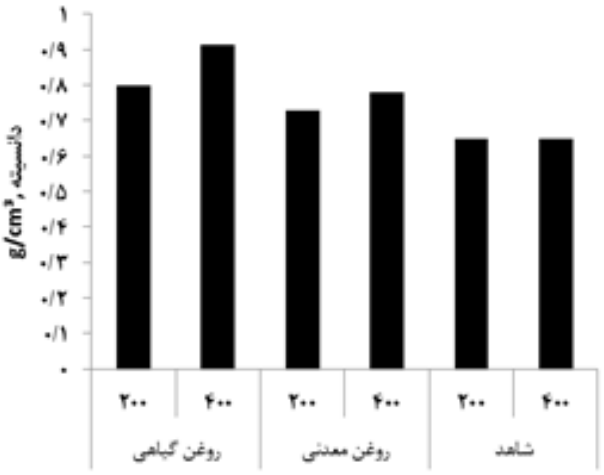
شکل ۷. میانگین شاخص مقاومت به کشش کاغذهای دی‌الکتریک دست‌ساز

1. agave sisalana

آن‌ها دماهای ۳۰، ۸۰، و ۱۰۰ درجهٔ سلسیوس را بررسی و مشاهده کردند با افزایش دما از میزان مقاومت به کشش کاسته می‌شود. همچنین، لانگارد و همکاران، در مطالعه‌ای دربارهٔ آثار رطوبت، اکسیژن، دما، و اسیدیته بر کاغذهای کرافت و تقویت‌شده در برابر حرارت، اعلام کردند که خشک کردن کاغذها پیش و پس از آغشته‌سازی با روغن معدنی مقاومت به کشش آن‌ها را کاهش می‌دهد. آن‌ها میزان تخریب کاغذ را در دامنهٔ دمایی ۷۰ تا ۱۳۰ درجهٔ سلسیوس بررسی و مشاهده کردند که با اعمال حرارت و افزایش آن از میزان مقاومت به کشش کاسته می‌شود. این کاهش با افزایش مدت حرارت‌دهی افزایش یافت. بیشترین مقاومت مکانیکی کاغذ ناشی از زنجیره‌های سلولزی است، درحالی که همی‌سلولزها و لیگنین مواد چسبنده و آمورفی‌اند که به چسباندن فیبریل‌ها و الیاف به هم کمک می‌کنند. احتمالاً، وقتی اتصالات درونی در زنجیره‌های سلولز شکسته شوند، مقدار DP کاهش می‌یابد و مقاومت مکانیکی سلولز افت می‌کند [۱۷].

دانسیته

شکل ۸ میانگین دانسیتهٔ کاغذهای دست‌ساز را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، می‌توان مشاهده کرد که دانسیتهٔ کاغذهای آغشته به روغن گیاهی در کل بیشتر از کاغذهای آغشته به روغن معدنی است. این امر را می‌توان ناشی از دانسیتهٔ بیشتر روغن گیاهی نسبت به روغن معدنی دانست. همچنین، در تحقیق مشابهی، سوارنو و ایروان، طی مطالعاتی بر کاغذهای آغشته‌شده به درصدهای مختلفی از اختلاط روغن استر با روغن معدنی، بیان کردند که با افزایش اختلاط روغن استر میزان دانسیته افزایش می‌یابد. آن‌ها این امر را ناشی از دانسیتهٔ بیشتر استر نسبت به روغن معدنی دانستند که در نتیجه با افزایش میزان استر دانسیتهٔ کلی کاغذهای آغشته به روغن هم افزایش می‌یابد [۸]. از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهد که دانسیتهٔ نمونه‌های آغشته به روغن گیاهی با درجهٔ روانی ml ۴۰۰ بیشتر از سایر نمونه‌هاست که می‌تواند به‌علت جذب بیشتر روغن گیاهی به‌سبب منافذ بیشتر و دانسیتهٔ بالاتر روغن گیاهی باشد.



شکل ۸. میانگین دانسیتهٔ کاغذهای دی‌الکتریک دست‌ساز

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پالایش موجب بهبود خواص دی‌الکتریک مثل ظرفیت و ثابت دی‌الکتریک، و خواص مقاومتی مثل شاخص مقاومت به کشش کاغذهای عایق الکتریکی می‌شود. از طرفی، خواص دی‌الکتریک به‌دست‌آمده از کاغذهای حاصل از خمیرکاغذ رنگ‌بری‌نشدهٔ باگاس به پتانسیل این نوع الیاف در ساخت کاغذهای عایق اشاره می‌کند. البته، این مادهٔ اولیهٔ ارزان‌قیمت، به‌ویژه در زمینهٔ ارتقای خواص مقاومتی، نیاز به مطالعهٔ بیشتری دارد. همچنین، طبق نتایج به‌دست‌آمده، روغن گیاهی کانولا، صرف‌نظر از مقاومت عایقی پایین‌تر و ضریب تلفات بالاتر، از نظر سایر خواص دی‌الکتریک دارای شرایط بهتری نسبت به روغن معدنی است و مشروط به مطالعات بیشتر به‌ویژه پس از طی آزمایش‌های موفقیت‌آمیز پیرشدگی می‌تواند برای کاربرد در ترانسفورماتورها توصیه شود.

References

[1]. Heathcoat, M.J. (2007). J & P Transformer Book (Thirteenth Edition), Newnes (An imprint of Elsevier), pp. 992.

[2]. Jian, L., Grzybowski, S., Yanfei, S., and Xiaoling Ch., (2007). Dielectric properties of rapeseed oil paper insulation. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 14-17 Oct., Vancouver, BC, 500-503.

[3]. Mcshane, P.C. (2002). Vegetable-oil-based dielectric coolants. IEEE Industry Applications Magazine, 3(8): 34-41.

[4]. Dai, J. and Wang, Z.D. (2008). A comparison of the impregnation of cellulose insulation by ester and mineral oil. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15(2): 374-381.

[5]. Liao, R., Hao J., Chen G., Ma Zh. and Yang, L. (2011). A Comparative study of physicochemical, dielectric and thermal properties of pressboard insulation impregnated with natural ester and mineral oil. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 18: 1626-1637.

[6]. Martin, D., Wang, Z.D., Dyer P., Darwin A.W. and James I.R. (2007). A Comparative study of the dielectric strength of ester impregnated cellulose for use in large power transformers. International Conference on Solid Dielectrics, 8-13 July, Winchester, UK, 294-297.

[7]. Hemmer, M., Badent, R. and Leihfried, T. (2003). Electrical properties of vegetable oil-impregnated paper insulation. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,19-22 Oct., 60-63.

[8]. Suwarno, I., and Surya, D. (2008). Dielectric properties of mixtures between mineral oil and natural ester from palm oil. Wseas Transaction on Power Systems, 2(3): 37-46.

[9]. Mohsen, F., and Mobarak, F. (1996). Effect of impregnation with linseed oil on electrical properties of cotton stalks and wood paper. Journal of Scientific and Industrial Research, 7(55):511-515.

[10]. Moradian, G.K., Azadfallah, M., Shayegani, A. and Abdolkhani A. (2013). Dielectric properties of oil impregnated kraft and soda pulps. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 28 (2):329-340.

[11]. Tuysserkani, H. (2001). Principles of Materials Science (Structure, Properties and Engineering), 2nd Edition, Isfahan University of Technology Press, pp. 649.

[12]. Mohseni, H. (2006). Basic of High Pressure Electrical Engineering, 2nd edition, University of Tehran Press, pp. 833.

[13]. Samariha, A., Nemati, M., Hemmasi, A.H. (2011). Effects of refining intensity on charecteristics of pulp produced from bagasse through neutral sulfite semi-chemical pulping. American-Eurasian Journal Agricultural and Environmental Science, 11(1): 10-14.

[14]. Kane, Daniel E. (1953). A Study of the relationship between the dielectric constant and accessibility of cellulose, Doctor's Dissertation, The Institute of Paper Chemistry Appleton, Wisconsin, pp. 64.

[15]. Casey, J.P. (1980). Pulp and Paper:Chemistry and Chemical Technology. Vol. 3, 3rd Edition. John wiley and Sons. New York, pp. 592.

[16]. Li, Y., Mai, Y. W. and Ye, L. (2000). Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. Composites Science and Technology, 60(11): 2037-2055.

[17]. Lundgaard, L.E., Hansen, W., Linhjell, D. and Painter T.J. (2004). Aging of oil-impregnated paper in power transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 19(1): 230-239.