

ارزیابی کهنگی تسریع شده کاغذهای عایق بهسازی شده ترانسفورماتور به لحاظ حرارتی توسط دی‌سیان‌دی‌آمید

حمید خدابنده‌لو^۱، محمد آزادفلاح^{۲*} و امیرعباس شایگانی اکمل^۳

۱- کارشناس ارشد صنایع خمیر و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۲- نویسنده مسئول، استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، پست الکترونیکی: adfallah@ut.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: شهریور ۱۳۹۴ تاریخ پذیرش: فروردین ۱۳۹۵

چکیده

کاغذهای دی‌الکتریک آغشته به روغن از اجزای اصلی ترانسفورماتورهای توزیع و تعیین‌کننده زمان سرویس آن هستند؛ بنابراین ارتقاء پایداری این نوع کاغذها موجب افزایش طول عمر ترانسفورماتورها می‌شود. از این رو در این تحقیق از خمیرکاغذ کرافت رنگبری‌نشده الیاف بلند و ترکیبی از آن با خمیرکاغذ سودای باگاس با نسبت ۲۰٪ به ۸۰٪ برای ساخت کاغذهای دی‌الکتریک آغشته به روغن با وزن پایه 60 g/m^2 استفاده شد. سپس تأثیر استفاده از مقادیر متفاوت دی‌سیان‌دی‌آمید در ساختار این کاغذها و همچنین اثر کهنه‌سازی حرارتی روی ویژگی‌های دی‌الکتریک و مقاومت به کشش کاغذهای عایق مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، با افزایش مقدار دی‌سیان‌دی‌آمید، ظرفیت و شاخص مقاومت به کشش در مقایسه با نمونه‌های عمل‌آوری‌نشده کاهش یافت ولی تلفات دی‌الکتریک، مقاومت عایقی و ولتاژ شکست بهبود پیدا کرد. با وجود این، طی فرایند کهنگی در بیشتر خواص دی‌الکتریک کاغذهای عایق، تغییرات اندکی مشاهده شد ولی دی‌سیان‌دی‌آمید باعث جلوگیری از افت مقاومت به کشش کاغذهای عایق شد. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که دی‌سیان‌دی‌آمید در پایداری حرارتی کاغذهای عایق در معرض شرایط مخرب ترانسفورماتورهای پر شده با روغن به‌طور کارآمد عمل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: دی‌سیان‌دی‌آمید، کاغذ عایق، بهسازی حرارتی، کهنگی، ترانسفورماتور.

مقدمه

روغن معدنی می‌باشند (Badicu *et al.*, 2010). اگرچه سلولز به‌تنهایی دارای ضریب دی‌الکتریک بالایی است ولی ضریب دی‌الکتریک کاغذ به دلیل خلل و فرج آن و ضریب دی‌الکتریک کم هوا پایین است. برای غلبه بر این مشکل، کاغذ را با روغن آغشته می‌کنند تا منافذ کاغذ را مسدود کرده و باعث بهبود خواص دی‌الکتریک شود (Torgovnikov, 1993). کاغذ مورد استفاده در دستگاه‌های الکتریکی معمولاً

ترانسفورماتورهای توزیع یکی از اجزای گران‌قیمت و راهبردی برای سیستم‌های توزیع نیروی برق می‌باشند، بنابراین عملکرد صحیح و مناسب آنها برای پایداری سیستم مهم است (Mirzaie *et al.*, 2009). اغلب ترانسفورماتورهای قدرت مورد استفاده برای انتقال و توزیع انرژی الکتریسته حاوی عایق‌های ساخته شده بر پایه سلولز (کاغذ کرافت) و

ساخته شده حدود ۱۲۰۰ است و بعد از عبور از مراحل خشک کردن و نصب در ترانسفورماتور DP کاغذ به حدود ۱۰۰۰ خواهد رسید و در این حالت رطوبت آن حدود ۰/۵ درصد است. زمانی که DP کاغذ به ۲۰۰ می‌رسد مقاومت کششی آن تا ۲۰٪ مقدار اولیه آن کاهش می‌یابد. در این حالت عمر مفید ترانسفورماتور به پایان رسیده است (Lundgaard, 2004).

در این تحقیق به منظور هموارسازی مسیر توسعه دانش فنی در ساخت این نوع از کاغذهای عایق و مقاوم به حرارت ترانسفورماتور در داخل کشور به‌ویژه با استفاده از الیاف باگاس به‌عنوان جایگزین بخشی از الیاف بلند کرافت اقدام به بررسی اثر افزودن دی‌سیان‌دی‌آمید و تأثیر کهنگی حرارتی بر ویژگی‌های دی‌الکتریک و مکانیکی کاغذ آغشته به روغن شده است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از دو نوع خمیر کاغذ برای ساخت کاغذهای دست‌ساز استفاده شد. خمیر کاغذ کرافت رنگبری‌نشده الیاف بلند وارداتی و خمیر کاغذ سودای باگاس که از کارخانه پارس تهیه شد. این خمیر کاغذها طبق دستورالعمل T۲۴Asp-۰۸ استاندارد TAPPI به‌وسیله پالایشگر PFI تا درجه روانی CSF ۱۵±۳۰ پالایش شدند. نشاسته کاتیونی از شرکت گلوکوزان، دی‌سیان‌دی‌آمید از شرکت Merk و روغن معدنی مورد نیاز برای اشباع کاغذها از شرکت ارس صبا تهیه شد.

ساخت کاغذهای دست‌ساز و اعمال دی‌سیان‌دی‌آمید ساخت کاغذهای دست‌ساز با گرماژ 60 g/m^2 براساس استاندارد TAPPI آیین‌نامه شماره ۸۸-۲۰۵ T و با استفاده از دستگاه ورقه‌ساز Frank انجام شد. در ساخت همه کاغذها از ۱/۵٪ نشاسته به‌عنوان عامل مقاومت خشک استفاده شد. پس از ساخت کاغذها، آنها را در محلول‌های ۲٪، ۴٪ و ۶٪ دی‌سیان‌دی‌آمید به مدت ۳۰ ثانیه غوطه‌ور و پس از خشک کردن دوباره در هوای آزاد در شرایط دمایی 23°C و $\text{RH}=60\%$ متعادل‌سازی شدند. در جدول ۱ تیمارهای اعمالی به‌طور خلاصه ارائه شده است.

کاغذ کرافت است. ویژگی‌های الکتریکی در ارتباط با کاغذ و مقوا شامل رسانایی حجمی^۱، رسانایی سطحی^۲، ثابت دی-الکتریک^۳، تلفات دی‌الکتریک^۴، قابلیت نفوذ الکتریکی^۵ و مقاومت شکست دی‌الکتریک^۶ است. زمانی که کاغذ به‌عنوان عایق استفاده می‌شود باید دارای رسانایی کم، تلفات دی-الکتریک کم و مقاومت شکست دی‌الکتریک بالایی باشد (Mark and Jens, 2002). دمای سیستم عایق ممکن است به دلایل مختلف افزایش یابد و این افزایش دما باعث تخریب کاغذ شده و اثر منفی روی ویژگی‌های دی‌الکتریک بگذارد (Badicu et al., 2010). کاغذهای آغشته به روغن معمولاً به دلیل تنش‌های حرارتی، رطوبت و اسیدیته دچار کهنگی شده و تخریب آن (کاغذ عایق) باعث کاهش عمر ترانسفورماتور می‌شود (Nasrat et al., 2013). سرعت کهنگی معمولاً تابعی از دما و رطوبت است. کاغذ و روغن در دمای بالا سریع‌تر کهنه‌شده و رطوبت نقش تسریع‌کننده دارد (Meshkatoddini, 2008). کاهش ویژگی‌های مکانیکی در کاغذ عایق، عامل تأثیرگذار اصلی برای تعیین زمان سرویس ترانسفورماتور است (Yamagata, 2009). کاغذهای بهبودیافته حرارتی برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط افزودن بازهای آلی و ضعیف از قبیل دی‌سیان‌دی‌آمید، اوره و یا ملامین برای خنثی کردن اسیدهای تولید شده بر اثر اکسیداسیون کاغذ و روغن ترانسفورماتور تولید شدند. استفاده از این نوع کاغذ اجازه داد تا دمای سیم‌پیچ در ترانسفورماتور تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کند. در واقع افزودن دی-سیان‌دی‌آمید به ساخت عایقی با مقاومت به حرارت و اکسیداسیون بیشتر کمک کرد (Muller, 2007). معمولاً از مقاومت به کشش کاغذ و DP^7 (درجه پلیمریزاسیون) سلولز موجود در کاغذ عایق به‌عنوان عاملی برای تعیین طول عمر ترانسفورماتور استفاده می‌شود. اغلب DP سلولز کاغذ تازه

- 1 - Volume conductivity
- 2 - Surface conductivity
- 3 - Dielectric constant
- 4 - Dielectric loss
- 5 - Permittivity
- 6 - Dielectric breakdown strength
- 7 - Degree of Polymerization

جدول ۱- تیمارها و عوامل متغیر در ساخت

کاغذهای دی الکتریک

تیمار	ترکیب خمیر کاغذ	غلظت محلول دی سیان دی آمید (%)
۱	۱۰۰٪ الیاف بلند	۰
۲	۲۰٪ الیاف بلند + ۸۰٪ الیاف باگاس	۰
۳	۱۰۰٪ الیاف بلند	۲
۴	۲۰٪ الیاف بلند + ۸۰٪ الیاف باگاس	۲
۵	۱۰۰٪ الیاف بلند	۴
۶	۲۰٪ الیاف بلند + ۸۰٪ الیاف باگاس	۴
۷	۱۰۰٪ الیاف بلند	۶
۸	۲۰٪ الیاف بلند + ۸۰٪ الیاف باگاس	۶

کهنه سازی

فرایند کهنه سازی کاغذها در داخل روغن معدنی در دمای 140°C و به مدت ۵، ۲۸، ۱۵۰ و ۸۰۰ ساعت انجام شد. خواص کاغذهای عایق قبل از کهنگی (در حالت اشباع شده با روغن) و در طی فرایند کهنگی در فواصل زمانی مذکور اندازه گیری شدند.

آزمون های اندازه گیری خواص

ظرفیت و تلفات دی الکتریک کاغذهای اشباع شده با استفاده از دستگاه SOKEN در دمای 20°C و ولتاژ ۲۰۰ ولت اندازه گیری شدند. برای اندازه گیری مقاومت عایقی از دستگاه MEGER در ولتاژ ۵۰۰ ولت استفاده شد. در اندازه گیری ولتاژ شکست دی الکتریک، الکترودهای ویژه در فاصله معینی از یکدیگر قرار گرفته و به آنها مقدار مشخصی ولتاژ اعمال شد. سپس ولتاژ تا وقوع شکست به تدریج افزایش یافته و به این ترتیب ولتاژ شکست در شرایط خاص به دست آمد. مقاومت کششی کاغذها نیز طبق استاندارد ۱۹۲۴ ISO با استفاده از آزمونگر فرانک اندازه گیری شد.

نتایج

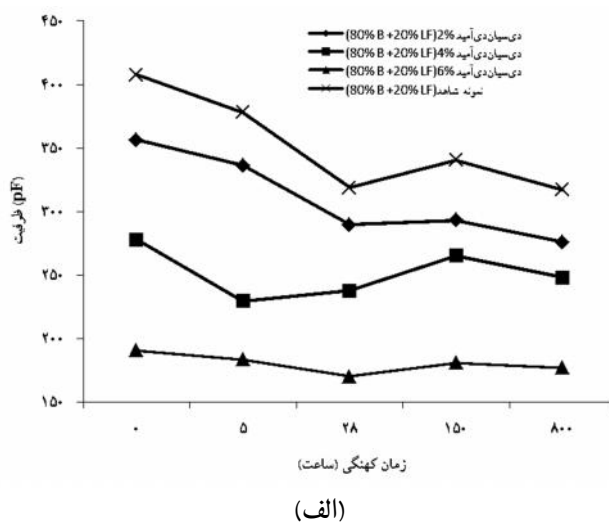
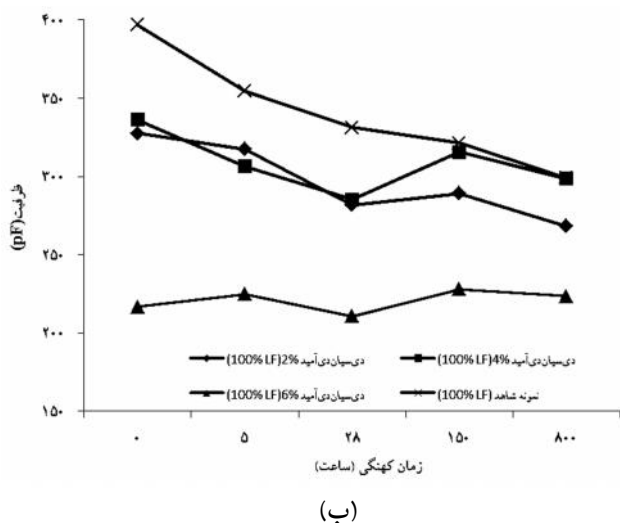
شکل ۱ اثر کهنگی بر ظرفیت کاغذهای غوطه ور شده در محلول دی سیان دی آمید با غلظت های مختلف را نشان می دهد. نتایج اندازه گیری نشان می دهد که تیمار هر دو نوع کاغذ با محلول دی سیان دی آمید در غلظت های مختلف به طور کلی موجب کاهش ظرفیت شده است. همچنین با توجه به شکل ۱ مشخص است که با افزایش زمان کهنگی، ظرفیت هم برای کاغذهای اختلاطی غوطه ور شده در دی سیان دی آمید ۲٪ و هم برای کاغذهای ساخته شده از ۱۰۰٪ الیاف بلند و غوطه ور شده در دی سیان دی آمید ۲٪، با شدت بیشتری کاهش می یابد. وقتی غلظت دی سیان دی آمید به ۴٪ افزایش می یابد، شیب کاهش ظرفیت کمتر شده، به طوری که برای کاغذهای غوطه ور شده در دی سیان دی آمید ۶٪ با گذشت زمان کهنگی در ظرفیت تغییرات کمتری مشاهده می شود.

تعیین مقدار نیتروژن

مقدار نیتروژن نمونه ها به عنوان معیاری از میزان جذب دی سیان دی آمید با استفاده از روش کج دال تعیین شد. درصد نیتروژن نمونه ها پس از غوطه وری در محلول هایی با غلظت ۲٪، ۴٪ و ۶٪ به ترتیب ۴۷/۴٪، ۶/۲۵٪ و ۷/۷٪ به دست آمد.

اشباع کردن کاغذها با روغن معدنی

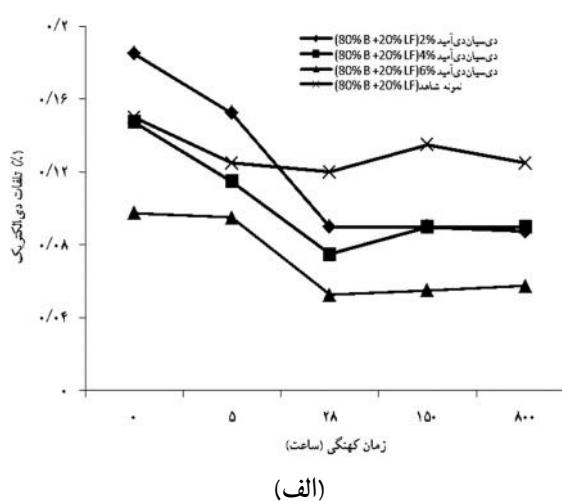
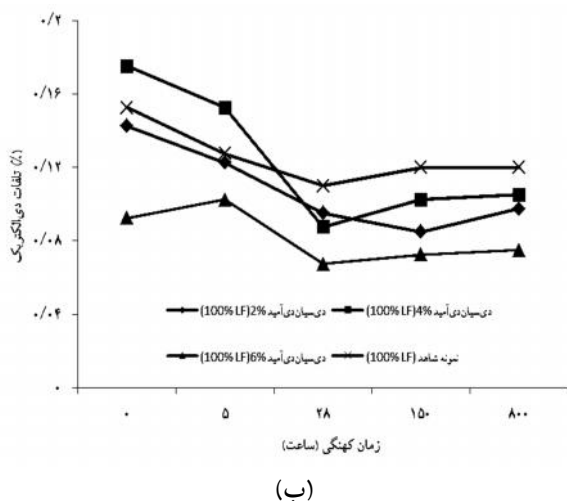
پس از خشک کردن کاغذهای دست ساز و همین طور خشک کردن و گاززدایی از روغن معدنی، همزمان با اعمال خلأ و دما روغن به سیستم حاوی کاغذها تزریق شد. سپس کاغذها به مدت ۲ ساعت در دمای 90°C تحت خلأ قرار گرفتند تا روغن به طور کامل به حفره های کاغذ نفوذ کند. در نهایت کاغذها به مدت ۱۲ ساعت درون آن در دمای 70°C قرار داده شدند تا فرایند آغشته سازی تکمیل گردد.



شکل ۱- اثر کهنگی حرارتی بر ظرفیت کاغذهای عایق حاوی دیسیان‌دی‌آمید؛ الف) خمیر کاغذ پایه متشکل از ۲۰٪ الیاف بلند (LF) و ۸۰٪ الیاف باگاس (B) و ب) خمیر کاغذ پایه متشکل از ۱۰۰٪ الیاف بلند (LF)

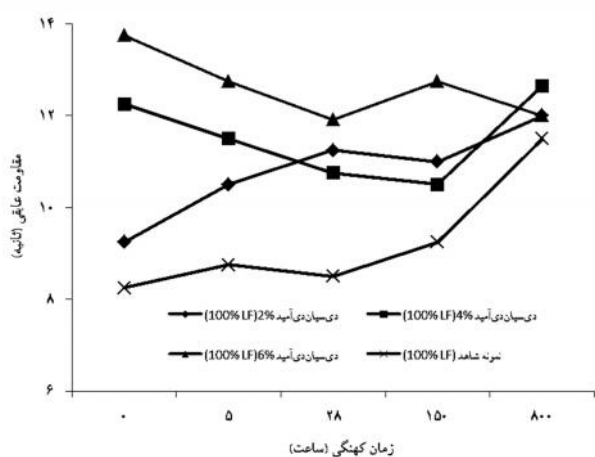
مشخص است که با افزایش زمان کهنگی تا ۲۸ ساعت، تلفات دی‌الکتریک به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و از زمان ۲۸ ساعت تا ۸۰۰ ساعت تلفات دی‌الکتریک با شیب ملایم اندکی افزایش یافته است. در ابتدای دوره کهنگی اختلاف تلفات دی‌الکتریک برای کاغذهای غوطه‌ور شده در محلول دیسیان‌دی‌آمید ۲٪ و ۶٪ زیاد است و با افزایش زمان کهنگی این اختلاف کاهش یافته است.

شکل ۲ اثر کهنگی بر تلفات دی‌الکتریک کاغذهای غوطه‌ور شده در محلول دیسیان‌دی‌آمید با غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج به خوبی نشان می‌دهد که کاغذهای تیمار شده با دیسیان‌دی‌آمید در کلیه غلظت‌ها در طی کهنه‌سازی موجب کاهش تلفات دی‌الکتریک شده‌اند، با وجود این بیشترین کاهش تلفات دی‌الکتریک در مقایسه با نمونه‌های تیمار نشده در نمونه‌های غوطه‌ور شده در محلول دیسیان‌دی‌آمید با غلظت ۶٪ مشاهده شد. با توجه به شکل



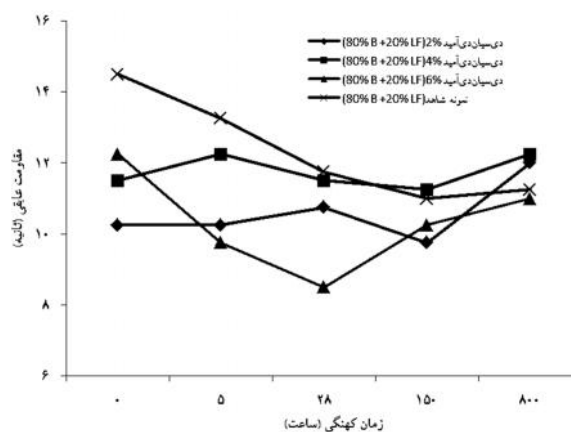
شکل ۲- اثر کهنگی حرارتی بر تلفات دی‌الکتریک کاغذهای عایق حاوی دیسیان‌دی‌آمید؛ الف) خمیر کاغذ پایه متشکل از ۲۰٪ الیاف بلند (LF) و ۸۰٪ الیاف باگاس (B) و ب) خمیر کاغذ پایه متشکل از ۱۰۰٪ الیاف بلند (LF)

مشاهده شد. علاوه بر این در پایان دوره کهنه سازی اختلاف بین مقادیر مقاومت عایقی در کلیه نمونه های تیمار شده و نشده به کمترین حد رسیده است. از آنجا که هدایت (عکس مقاومت) الیاف سلولزی عمدتاً به حضور مولکول های جذب شده آب در سطح الیاف بستگی دارد، با گذشت زمان کهنه سازی و احتمالاً تأثیر حرارت و عمل دی سیان دی آمید (شکل ۱۰) میزان آب (رطوبت) در کلیه نمونه ها به یک اندازه رسیده و باعث شده است تا در پایان مدت زمان کهنه سازی میزان مقاومت عایقی تقریباً مشابه باشند.



(ب)

در شکل ۳ اثر کهنگی بر مقاومت عایقی کاغذهای غوطه ور شده در محلول دی سیان دی آمید با غلظت های مختلف نشان داده شده است. با توجه به نتایج الگو، تغییرات مشخص و منظمی را نمی توان متصور شد، به طوری که در مواردی مانند نمونه های تیمار شده با محلول دی سیان دی آمید ۶٪ تا اوایل زمان کهنه سازی یعنی ۲۸ ساعت با افت مقاومت عایقی و پس از آن با افزایش مقاومت مواجه شده است. در مورد نمونه های تیمار شده با سایر غلظت ها در هر دو نوع ترکیب خمیر کاغذ، افزایش مقاومت در طول دوره کهنه سازی

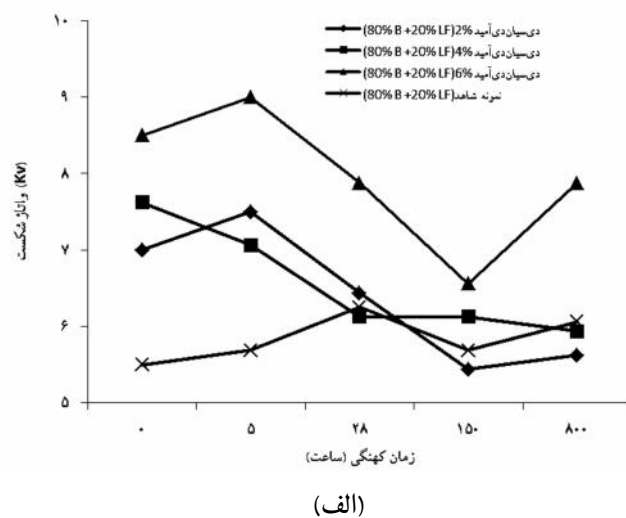
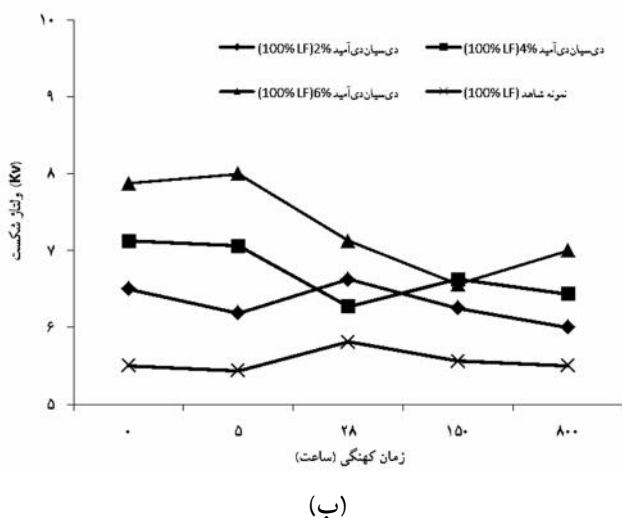


(الف)

شکل ۳- اثر کهنگی حرارتی بر مقاومت عایقی کاغذهای عایق حاوی دی سیان دی آمید؛ (الف) خمیر کاغذ پایه متشکل از ۲۰٪ الیاف بلند (LF) و ۸۰٪ الیاف باگاس (B) و (ب) خمیر کاغذ پایه متشکل از ۱۰۰٪ الیاف بلند (LF)

غوطه ور شده در محلول ۲٪ کمترین ولتاژ شکست را نشان دادند. در بیشتر نمونه های تیمار شده روند کاهش ولتاژ شکست تا ۸۰۰ ساعت کهنگی قابل مشاهده است. شکل ۵ اثر کهنگی بر شاخص مقاومت به کشش کاغذهای غوطه ور شده در محلول دی سیان دی آمید با غلظت های مختلف را نشان می دهد. اختلاف مشاهده شده در مقادیر شاخص مقاومت به کشش بین نمونه های ساخته شده از الیاف بلند و اختلاط آن با الیاف باگاس با توجه به تفاوت های موجود در ماهیت الیاف و نوع فرایند قابل انتظار است.

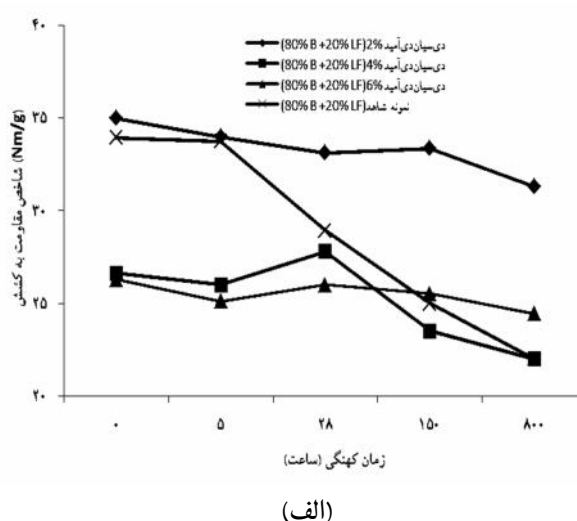
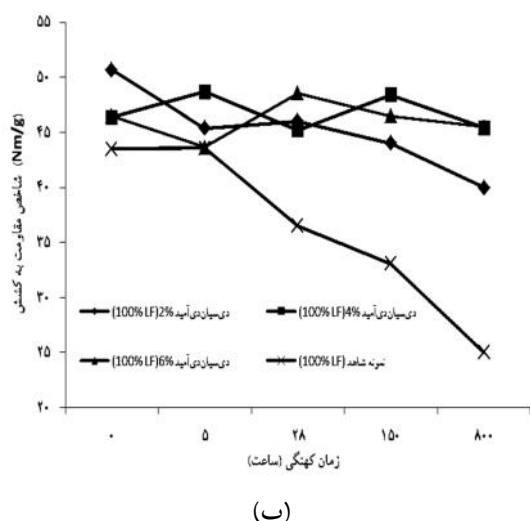
نتایج اثر کهنگی بر ولتاژ شکست کاغذهای غوطه ور شده در غلظت های مختلف محلول دی سیان دی آمید نیز در شکل ۴ ارائه شده است. به طور کلی نمونه های تیمار شده در مقایسه با نمونه های تیمار نشده در ولتاژهای بالاتر دچار شکست می شوند. همچنین مشخص است که نمونه های اختلاطی ولتاژ شکست بیشتری نسبت به نمونه های متناظر الیاف بلند دارند. به نحوی که با افزایش غلظت محلول دی سیان دی آمید ولتاژ شکست افزایش می یابد، به طوری که نمونه اختلاطی غوطه ور شده در محلول ۶٪ بیشترین ولتاژ شکست و نمونه الیاف بلند



شکل ۴- اثر کهنگی حرارتی بر ولتاژ شکست کاغذهای عایق حاوی دی سیان دی آمید؛ الف) خمیر کاغذ پایه متشکل از ۲۰٪ الیاف بلند (LF) و ۸۰٪ الیاف باگاس (B) و ب) خمیر کاغذ پایه متشکل از ۱۰۰٪ الیاف بلند (LF)

متفاوت وجود ندارد. همچنین با توجه به نتایج مشخص است که مقاومت به کشش کاغذهای غوطه ور شده در محلول دی سیان دی آمید ۶٪ در اثر کهنگی تقریباً حفظ شده است، در حالی که در نمونه های غوطه ور شده در محلول دی سیان دی آمید ۲٪ و ۴٪ کاهش اندکی قابل مشاهده است.

در نمونه های ساخته شده از اختلاط دو نوع الیاف بین نمونه های غوطه ور شده در محلول ۲٪ در مقایسه با نمونه های غوطه ور شده در محلول ۴٪ و ۶٪ اختلاف قابل توجهی دیده می شود، در حالی که در نمونه های الیاف بلند اختلاف چندانی در مقادیر شاخص مقاومت به کشش کاغذهای غوطه ور شده در محلول هایی با غلظت های



شکل ۵- اثر کهنگی حرارتی بر شاخص مقاومت به کشش کاغذهای عایق حاوی دی سیان دی آمید؛ الف) خمیر کاغذ پایه متشکل از ۲۰٪ الیاف بلند (LF) و ۸۰٪ الیاف باگاس (B) و ب) خمیر کاغذ پایه متشکل از ۱۰۰٪ الیاف بلند (LF)

بحث

یک نارسانای الکتریکی یا عایق معمولاً از طریق تأثیر بر میزان اختلاف پتانسیل (U)، بر ظرفیت خازن اثر می‌گذارد و به همین دلیل ظرفیت خازن به‌عنوان معیاری از عملکرد عایق‌های سلولزی ساخته شده، اندازه‌گیری شده است. بین ظرفیت (C) و ضخامت عایق (d) رابطه عکس برقرار است ($C = \frac{A}{d}$)، به طوری که هر چه ضخامت عایق بیشتر باشد ظرفیت کاهش خواهد یافت. با افزایش غلظت محلول مقدار بیشتری از دی‌سیان‌دی‌آمید در بین الیاف و روی آن رسوب کرده و باعث افزایش ضخامت کاغذ شده است. به‌عنوان مثال کاغذهای غوطه‌ور شده در محلول ۲٪ دی‌سیان‌دی‌آمید ضخامت کمتری نسبت به کاغذهای غوطه‌ور شده در محلول ۶٪ دی‌سیان‌دی‌آمید دارند و این ضخامت کمتر باعث ظرفیت بیشتر این نمونه‌ها شده است. در تحقیق انجام‌شده توسط Timko و همکاران (۲۰۱۰) در رابطه با تأثیر آغشته‌سازی کاغذ با روغن بر ظرفیت نیز گزارش شد که با افزایش ضخامت کاغذ ظرفیت کاهش می‌یابد. در ابتدای زمان کهنگی تفاوت ظرفیت بین نمونه‌های مختلف زیاد است و با گذشت زمان کهنگی، این اختلاف کاهش می‌یابد و در زمان ۸۰۰ ساعت به کمترین اختلاف می‌رسد. در تحقیقی مشابه Hadjadj و همکاران (۲۰۱۳) ویژگی‌های الکتریکی کاغذ آغشته به روغن را به‌عنوان تابعی از زمان کهنگی مورد ارزیابی قرار دادند و مشاهده کردند که با افزایش زمان کهنگی، ظرفیت دی‌الکتریک تغییری نداشته است.

نمونه‌های غوطه‌ور شده در محلول ۶٪ دی‌سیان‌دی‌آمید تلفات دی‌الکتریک کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان دادند، اما این اختلاف قابل توجه نبود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد میزان رسوب دی‌سیان‌دی‌آمید در نمونه‌های غوطه‌ور شده در محلول ۶٪ بیشتر است و احتمال دارد که این رسوب بیشتر به‌ویژه در سطح کاغذ باعث تلفات دی‌الکتریک کمتر در این نمونه‌ها شده باشد. بنابراین ملاحظه می‌شود که استفاده از دی‌سیان‌دی‌آمید نه تنها باعث افزایش تلفات دی‌الکتریک نشده است؛ بلکه تا زمان ۲۸ ساعت کهنگی تلفات دی‌الکتریک کاهش یافته و پس از آن تا ۸۰۰ ساعت تغییر معنی‌داری

نداشته است. یافته‌های Hadjadj و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که با افزایش زمان کهنگی، تلفات دی‌الکتریک افزایش می‌یابد. از آنجایی که مقدار مقاومت عایقی برای همه نمونه‌ها حداکثر مقدار قابل اندازه‌گیری توسط دستگاه (۵۰G) به دست آمد، از این رو زمان رسیدن مقاومت نمونه‌ها به ۵۰G به‌عنوان معیاری از میزان مقاومت تعیین شد. با توجه به شکل ۳ مشخص است که افزایش غلظت محلول دی‌سیان‌دی‌آمید تأثیر معنی‌داری بر مقاومت عایقی نداشته است. در تحقیقی مشابه نیز Bassetto (۱۹۹۴) اثر کهنگی حرارتی را روی مقاومت عایقی کاغذ کرافت معمولی با کاغذ کرافت تیمار شده با دی‌سیان‌دی‌آمید مقایسه کرد و تفاوت قابل ملاحظه‌ای را بین آنها مشاهده نکرد. همچنین با توجه به نتایج مشخص است که زمان کهنگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت عایقی نداشته است. در مطالعات انجام‌شده توسط Hadjadj و همکاران (۲۰۱۳) نیز کاهش مقاومت عایقی با افزایش زمان کهنگی گزارش شده است.

Nasrat و همکاران (۲۰۱۳) اثر افزایش دما و زمان را طی کهنگی حرارتی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که ولتاژ شکست دی‌الکتریک با افزایش زمان از ۴۸ ساعت به ۹۶ ساعت و دمای کهنگی از ۱۱۰ به ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش می‌یابد. مطالعه اثر کهنگی حرارتی بر خواص کاغذهای کرافت آغشته به روغن معدنی و روغن گیاهی توسط Choi و Huh (۲۰۱۳) نشان داد که با افزایش زمان کهنگی، ولتاژ شکست کاهش می‌یابد و این کاهش برای کاغذهای آغشته به روغن معدنی بیشتر از کاغذهای آغشته به روغن گیاهیست. همچنین Moradian و همکاران (۲۰۱۳) طی یک مطالعه اثر نوع خمیرکاغذ بر ولتاژ شکست را مورد ارزیابی قرار دادند و مشاهده کردند که کاغذهای اختلاطی (الیاف بلند + الیاف باگاس) ولتاژ شکست بیشتری در مقایسه با کاغذ الیاف بلند دارند.

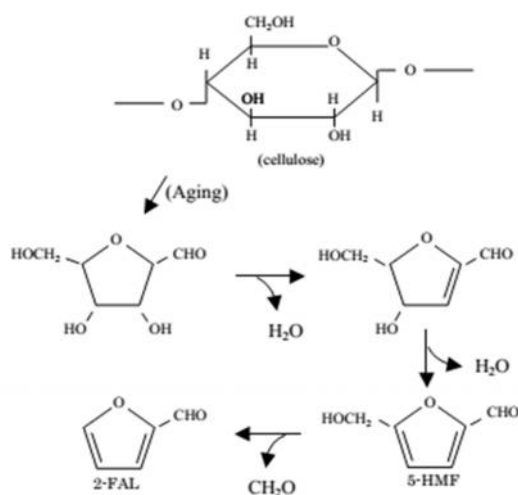
اثر دی‌سیان‌دی‌آمید روی شاخص مقاومت به کشش در دماهای بالا محسوس‌تر است. در مطالعه انجام شده توسط Ferrito و Stegehuis (۲۰۰۱) در مورد اثر دی‌سیان‌دی‌آمید روی کاغذ کرافت ماشین‌ساخت (صنعتی) و کاغذ دست‌ساز متشکل از ترکیب الیاف کرافت با الیاف سنتزی در دمای بالا

انجام شده توسط Choi و Huh (۲۰۱۳) بر روی تأثیر کهنگی حرارتی روی کاغذهای کرافت آغشته به روغن معدنی و روغن گیاهی مشخص شد که با افزایش زمان کهنگی مقاومت کششی کاهش می‌یابد و این افت برای کاغذ آغشته به روغن معدنی بیشتر گزارش شد.

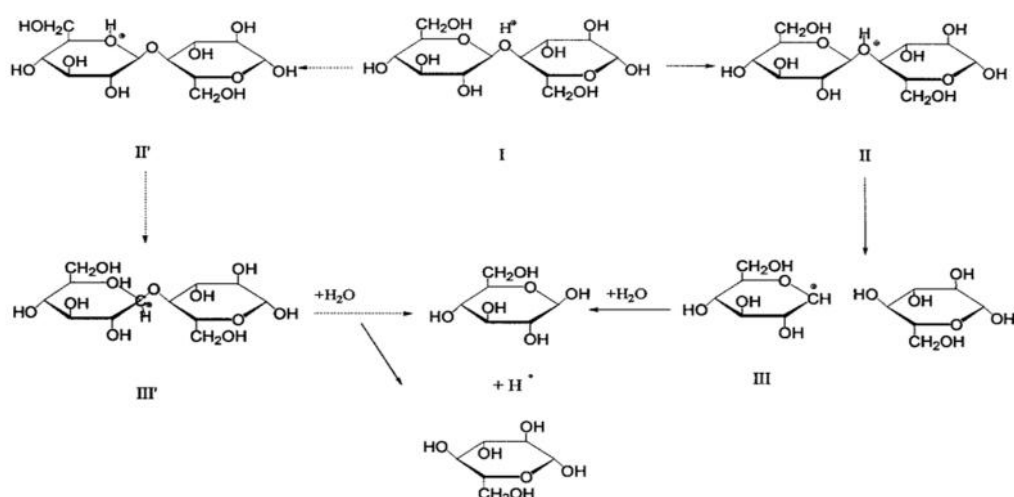
شکل ۶ سازوکار تشکیل ۲-فورآلدئید (2-FAL) بر اثر هیدرولیز سلولز طی فرایند کهنگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در جریان تشکیل 2-FAL، آب و فرمالدهید (CH_2O) نیز تولید می‌شود. از بین این دو، آب تشکیل شده باعث افزایش رطوبت کاغذ عایق می‌شود و تأثیر زیادی بر عمر ترانسفورماتور دارد. آلدئید تولید شده در اثر هیدرولیز سلولز در حضور اکسیژن محیط به اسید تبدیل می‌شود و اسید در اثر رطوبت، تفکیک شده و یون هیدروژن (پروتون) به وجود می‌آید (Miyagi et al., 2011). مطابق شکل ۷ در فرایند هیدرولیز اسیدی یون هیدروژن (پروتون) به اکسیژن پیوند گلیکوزیدی متصل شده و در مرحله بعد به موقعیت C۱ گلوکز منتقل شده و یون کربنیوم تولید می‌شود، در نتیجه پیوند گلیکوزیدی سست می‌شود. در نهایت یک حمله سریع روی یون کربنیوم توسط آب انجام می‌شود و پیوند گلیکوزیدی گسسته شده و یون هیدروژن (پروتون) دوباره تولید می‌شود (Fengel, 1989).

مشاهده شد که کاغذ کرافت ماشین‌ساخت تیمار شده با دی‌سیان‌دی‌آمید حدود ۵۰٪ شاخص مقاومت به کشش بیشتری نسبت به کاغذ دست‌ساز دارد. همچنین در بررسی دیگری که توسط Miyagi و همکاران (۲۰۱۱) بر روی اثر کهنگی حرارتی روی درجه پلیمریزاسیون (DP) کاغذ کرافت معمولی و کاغذ آغشته به دی‌سیان‌دی‌آمید (Thermo-ZA) انجام شد نیز بیشتر بودن درجه پلیمریزاسیون برای کاغذ آغشته به دی‌سیان‌دی‌آمید گزارش شده است.

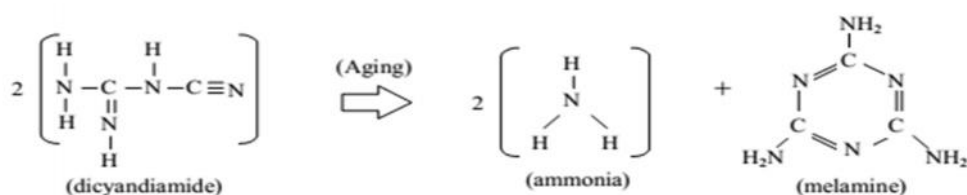
شاخص مقاومت به کشش مهمترین پارامتر برای کاغذهای دی‌الکتریک آغشته به روغن است. زیرا تعیین‌کننده طول عمر ترانسفورماتور بوده و زمان سرویس ترانسفورماتور را مشخص می‌کند. میزان کاهش شاخص مقاومت به کشش در ۸۰۰ ساعت برای کاغذهای اختلاطی و غوطه‌ور شده در دی‌سیان‌دی‌آمید ۲٪، ۴٪ و ۶٪ به ترتیب برابر ۱۰/۵٪، ۱۷/۳٪ و ۷٪ به دست آمد. درحالی‌که میزان کاهش شاخص مقاومت به کشش در ۸۰۰ ساعت برای کاغذهای حاوی ۱۰۰٪ الیاف بلند و غوطه‌ور شده در دی‌سیان‌دی‌آمید ۲٪، ۴٪ و ۶٪ به ترتیب برابر ۲۰٪، ۲٪ و ۲/۱۵٪ محاسبه شد که نشان‌دهنده عملکرد بسیار مناسب دی‌سیان‌دی‌آمید ۴٪ و ۶٪ در کاغذهای الیاف بلند است. البته افت بیشتر شاخص مقاومت به کشش در دماهای بالاتر و زمان‌های بیشتر، در مطالعات مشابه گزارش شده است (Nasrat et al., 2013). علاوه بر این در مطالعه



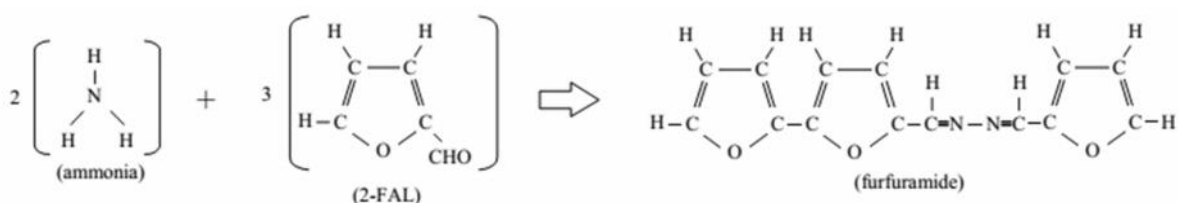
شکل ۶- تشکیل 2-FAL در اثر هیدرولیز سلولز به دلیل کهنگی (Miyagi et al., 2011)



شکل ۷- هیدرولیز اسیدی سلولز (Fengel, 1989)



شکل ۸- فرایند کهنگی در دیسیان‌دی‌آمید و تولید آمونیاک و ملامین (Miyagi et al., 2011)



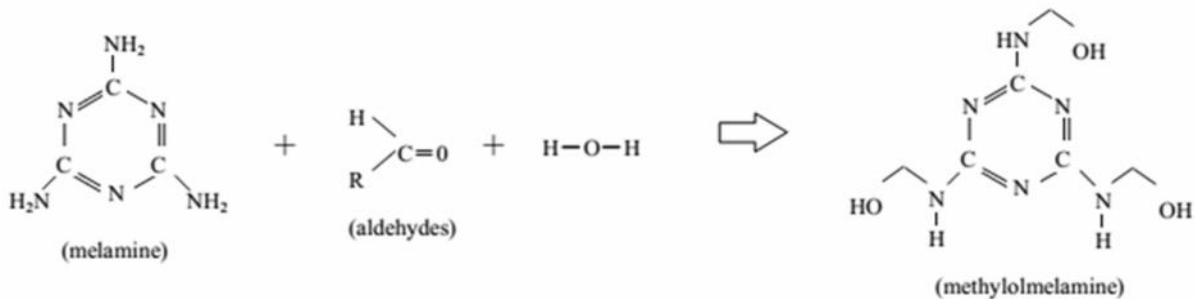
شکل ۹- واکنش آمونیاک با 2-FAL (Miyagi et al., 2011)

می‌شود (شکل ۱۰). مطابق این واکنش آلدهید تولید شده در اثر هیدرولیز سلولز از محیط حذف شده و خطر تولید اسید و یون پروتون از بین می‌رود. همچنین در اثر این واکنش آب تولید شده در اثر هیدرولیز سلولز که اثر منفی بر طول عمر ترانسفورماتور دارد از محیط حذف می‌شود (Miyagi et al., 2011). به این ترتیب با توجه به نتایج

همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود در طی فرایند کهنگی دیسیان‌دی‌آمید به آمونیاک و ملامین تبدیل می‌شود. سپس مطابق با واکنش ارائه شده در شکل ۹ آمونیاک با 2-FAL واکنش داده و فورفورآمید تشکیل می‌شود. در نهایت ملامین با آلدهید و آب تولید شده در اثر هیدرولیز سلولز واکنش می‌دهد و متیلول ملامین تولید

برابر تخریب حرارتی شده است.

به دست آمده، دی سیان دی آمید طی واکنش های ارائه شده در شکل های ۶ تا ۱۰ موجب پایداری کاغذهای عایق در



شکل ۱۰- واکنش ملامین با آلدهید و تولید متیلول ملامین (Miyagi et al., 2011)

- به طور کلی استفاده از دی سیان دی آمید عملکرد بسیار مؤثری در حفظ شاخص مقاومت به کشش کاغذهای عایق، یعنی مهمترین پارامتر کاغذهای دی الکتریک آغشته به روغن طی فرایند کهنگی نشان داد.

منابع مورد استفاده

- Badicu, L., Notinger, P.V., Dumitran, L. and Tanasescu, G., 2010. Thermal ageing of oil impregnated paper for power transformers insulation systems. *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*. (34):7-12.
- Bassetto, A., 1994. Laboratory techniques to assess the aging of electrical insulating papers. *Companhia Paulista de Força e Luz*, (http://www.buenomak.com.br/publicacoes/pdf/ISO_LACAO-1994_electrical_insulating_papers.pdf)
- Choi, S.H. and Huh, C.S., 2013. Analysis of the chemical and electrical characteristic of vegetable insulating oils exposed to accelerated aging. *2nd International Conference on Innovations in Electrical and Civil Engineering (ICIECE'2013)* Dec. 17-18, 2013 Pattaya (Thailand), 38-43.
- Fengel, D., 1989. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. De Gruyter
- Ferrito, S.J. and Stegehuis, R., 2001. High temperature reinforced cellulose insulation for use in electrical applications. *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES*. 2: 684-687. IEEE.

نتیجه گیری

- بین کاغذهای عایق ساخته شده از تنها الیاف بلند و ترکیبی از الیاف (۲۰٪ الیاف بلند + ۸۰٪ باگاس) در بیشتر ویژگی ها به جز شاخص مقاومت به کشش اختلاف قابل ملاحظه ای وجود ندارد. این یافته ها نشان می دهد که در صورت حل مشکل مقاومت به کشش پایین اولیه الیاف باگاس، به عنوان مثال اختلاط با درصد های بیشتر الیاف بلند و یا اختلاط با الیاف شاه دانه و یا سایر روش های در دسترس از این منبع برای ساخت کاغذهای دی الکتریک آغشته به روغن می توان استفاده کرد.

- غلظت های بالای دی سیان دی آمید اثرات متفاوتی روی ویژگی های دی الکتریک و مقاومتی کاغذها داشته است. به طوری که با افزایش غلظت دی سیان دی آمید ظرفیت و شاخص مقاومت به کشش کاهش ولی این افزایش غلظت اثرات مطلوبی روی سایر ویژگی های دی الکتریک داشته است. به طوری که تلفات دی الکتریک کاهش یافته و مقاومت عایقی و ولتاژ شکست دی الکتریک افزایش یافته است.

- زمان کهنگی اثر قابل توجهی بر بیشتر خواص دی الکتریک کاغذهای عایق نداشت.

- impregnated kraft and soda pulps. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 28 (2):329-340.
- Muller, W.W., 2007. Thermally upgraded paper in oil filled transformers. *Energize Journal*, EE Publishers, (<http://www.ee.co.za>). *Energize*, 30-35.
 - Nasrat, L.S., Kassem N. and Shukry, N., 2013. Aging effect on characteristics of oil impregnated insulation paper for power transformers. *Engineering*, 5:1-7.
 - Timko, M., Kop anský, P., Marton, K., Tom o, L. and Koneracká, M., 2010. Dielectric properties of transformer paper impregnated by mineral oil based magnetic fluid. *International Conference on Magnetism (ICM 2009)*, IOP Publishing Ltd, *Journal of Physics: Conference Series* 200, 072099.
 - Torgovnikov, G.I., 1993. *Dielectric Properties of Wood and Wood-based Materials*. Springer-Verlag Berlin, p.196.
 - Yamagata, N., Miyagi, K. and Oe, E. 2009. Aging effects on mixture of thermally upgraded paper and kraft paper in mineral oil. *Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, 2009 SAIEE*, Innes House, Johannesburg, Paper C40, 1-5.
 - Hadjadj, Y., Meghnefi, F., Fofana, I. and Ezzaidi, H., 2013. On the feasibility of using poles computed from frequency domain spectroscopy to assess oil impregnated paper insulation conditions. *Energies*, 6: 2204-2220.
 - Lundgaard, L., 2004. Aging of oil-impregnated paper in power transformers. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 19(1):230-239.
 - Mark, R. and Jens, B., 2002. *Handbook of Physical Testing of Paper*. Volume 1: CRC Press.
 - Meshkatoddini, M.R., 2008. Aging study and lifetime estimation of transformer mineral oil. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(4):384-386.
 - Mirzaie, M., Gholami, A. and Tayebi, H.R., 2009. Insulation condition assessment of power transformers using accelerated ageing tests. *Turkish journal of electrical engineering & computer sciences*. 17(1):39-54.
 - Miyagi, K., Oe, E., and Yamagata, N., 2011. Evaluation of aging for thermally upgraded paper in mineral oil. *The Journal of International Council on Electrical Engineering*, 1(2):181-187.
 - Moradian Gilan, K., Azadfallah, M., Shayegani, A.A., and Abdolkhani, A., 2013. Dielectric properties of oil

Accelerated aging assessment of thermally upgraded transformer insulation paper by dicyandiamide

H. Khodabandehloo.¹, M. Azadfallah^{2*} and A. A. Shaygani Akmal³

1- M.Sc., Pulp and Paper Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2- *Corresponding author, Assistant Professor, Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: adfallah@ut.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, School of Electrical & Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: Sep., 2015

Accepted: April, 2016

Abstract

The oil-impregnated dielectric papers are the main components of distribution transformer which govern its service time. Therefore, durability enhancement of this grade of paper will cause to extend transformers life. In this research, long fiber unbleached Kraft pulp and its mixture with bagasse soda pulp at the ratios of 20% to 80% were used to make oil-impregnated dielectric papers with the grammage of 60 g/m². The effect of dicyandiamide impregnation and its content in the paper structure and thermal aging were then assessed on dielectric properties and tensile strength of the insulation papers. The results showed that with increasing dicyandiamide content, the capacitance and tensile strength index decreased in comparison with untreated samples, but dielectric loss, insulation resistance, and breakdown voltage were improved. However, slight changes were observed in most dielectric properties during aging, but dicyandiamide caused to prevent loss of the tensile strength of insulated papers. Generally it could be concluded that dicyandiamide acts efficiently in thermal stabilization of insulation paper exposed to aggressive conditions inside the oil-filled transformer.

Key words: Dicyandiamide, insulation paper, thermal upgrading, aging, transformer.