دانشگاه
تهران

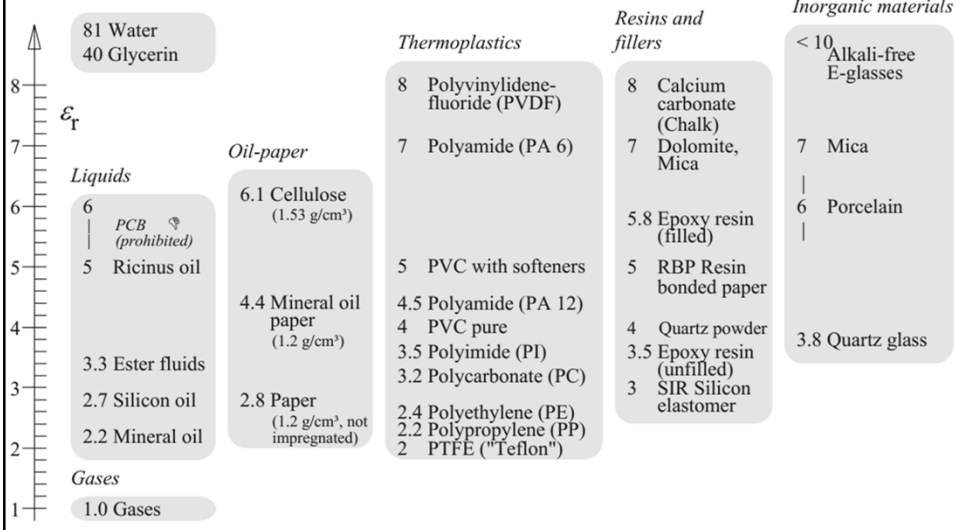
مواد عایقی مایع

دانشگاه
تهران

تقسیم‌بندی مواد عایقی

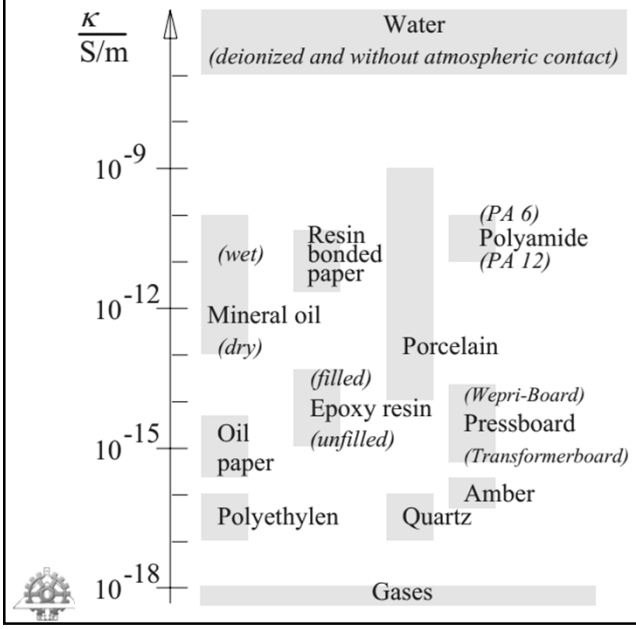
- ✓ تقسیم‌بندی از دیدگاه‌های مختلفی امکان‌پذیر است مثل حالت ماده، ساختار شیمیایی، تکنولوژی ساخت، محدوده کاربرد ....
- ✓ تقسیم‌بندی فعلی بر اساس مشخصات مهم و کاربردها در مهندسی فشارقوی است.
  - ✓ ۱- گازها: هوا، SF6، گازهای جایگزین
  - ✓ ۲- مواد عایقی جامد غیرارگانیک: سرامیک، پرسلان، شیشه، میکا
  - ✓ ۳- مواد سنتتیک با پلیمر بالا: مثل مواد عایقی ترموپلاستیک (Thermoplastic): پلی‌اتیلن و PVC. همین‌طور مواد پلاستیکی که با حرارت شکل می‌گیرند و سخت می‌شوند (Thermosetting Plastic) و همین‌طور الستومرها (elastomer): اپوکسی رزین، پلی‌اورتان، الستومرهای سیلیکونی
  - ✓ ۴- مواد عایقی مایع: روغن معدنی، مایعات سنتتیک، روغن‌های گیاهی
  - ✓ ۵- مواد با ساختار فیبرگونه: کاغذ، پرس‌بورد، مواد سنتتیک

میزان گذردهی نسبی عایق‌های مختلف



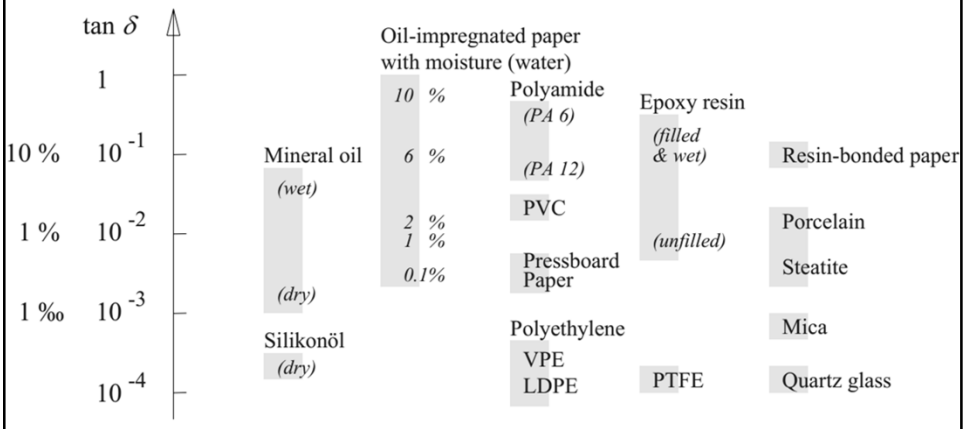
گذردهی نسبی مواد که دارای اهمیت تکنولوژیک هستند در فرکانس‌های تا 1 MHz تحت شرایط استاندارد جوی ($T = 20\ °C, p = 1\ bar$) به عنوان مقادیر نوعی

میزان هدایت الکتریکی عایق‌های مختلف



هدایت الکتریکی در دمای اتاق (در شکل فقط حدود مقادیر در دهه‌های مختلف بدون در نظر گرفتن عوامل مختلف نشان داده شده است)

میزان ضریب تلفات عایقی عایق‌های مختلف



ضریب تلفات عایقی (loss factor) در فرکانس قدرت (50 Hz) و دمای اتاق

وظایف مایع عایقی

- ✓ اصلی‌ترین هدف در ارتباط با عایق‌های مایع، پر کردن حفره‌های هر نوع ماده عایق با ماده‌ای است که بالاترین استقامت الکتریکی را داشته باشد.
- ✓ در مقایسه با گازها، استقامت الکتریکی مایعات حتی در فشار عادی به نحو قابل توجهی بالاتر است.
- ✓ همچنین به خاطر گذردهی بالاتر، جابه‌جایی میدان کمتری در مایعات صورت می‌گیرد.
- ✓ در ترانسفورماتورها، مایع عایقی بایستی گرمای ناشی از تلفات اهمی را به روش همرفت خارج کند.
- ✓ در گذشته مایع عایقی مثل روغن به عنوان خاموش‌کننده قوس در کلید نیز به کار می‌رفته است که این کاربرد با معرفی کلیدهای گازی و خلاء به مراتب کمتر شده است.
- ✓ امروزه فقط انواع قدیمی تپ‌چنجر تحت بار در روغن کار می‌کنند.

تکنولوژی عایق‌های مایع

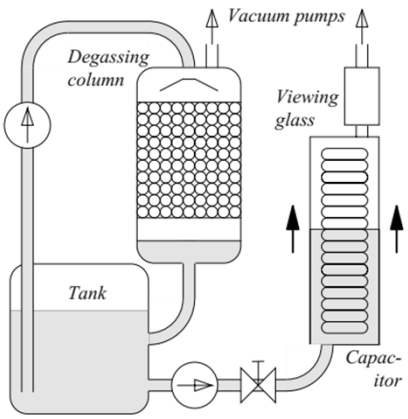
- ✓ در زمینه کاربرد عایق مایع، بایستی در زمینه‌های کار با آن، طراحی تجهیز، فرآیند اشباع و همچنین رصد وضعیت (condition monitoring) آن دقت کافی به عمل آید.
- ✓ در زمینه طراحی تجهیز بایستی انبساط حرارتی مایع عایقی و سایر مواد موجود لحاظ شود. ضریب افزایش حجمی مایع‌های عایقی در حدود 7 تا $10\times10^{-4}/K$ است. بنابراین برای ۱۰۰ درجه تغییر دما، حجم حدود 7% تا 10% افزایش خواهد یافت.
- ✓ در تجهیزات کوچک مثل خازن یا ترانسفورماتور توزیع معمولا از سطح مقطع مستطیلی که می‌تواند در اثر نیرو خمیده شود استفاده می‌شود. در این حالت، تجهیز به صورت هرمتیک آب‌بندی است.
- ✓ برای تجهیزاتی که سطح مقطع استوانه‌ای دارند از آکاردئونی فلزی با قابلیت انبساط استفاده می‌شود.
- ✓ همین هدف می‌تواند توسط مقداری هوا (N_2) در قسمت بالایی تجهیز دارای روغن برآورده شود. (gas cushion)

تزریق روغن و اشباع‌سازی

- ✓ پیش از پر کردن یک تجهیز بایستی روغن هم خشک شده و هم از گاز عاری شود (drying and degassing).
- ✓ برای این کار مایع تحت خلاء به یک ستون وارد شده و در دمای بالا از مسیر حلقه‌هایی عبور می‌کند که به لایه‌های نازکی تبدیل شده و گاز آن طی مدت طولانی خارج می‌شود (thin-film degassing).
- ✓ شرایط بایستی به نحوی انتخاب شود که اجزای سبک و بخارشدنی مایع از آن تبخیر نشوند.
- ✓ روغن معدنی می‌تواند در دمای 50 تا 60 °C تا مقدار رطوبت 0.5 تا 5 ppm خشک شود.
- ✓ در کنار خشک کردن روغن بایستی اطمینان حاصل کرد که ماده‌ای که قرار است اشباع شود نیز خشک باشد. عایق‌هایی که پایه سلولزی دارند می‌توانند مقدار زیادی رطوبت در خود نگه دارند.

فرآیند اشباع

- ✓ فرآیند اشباع به صورت کلی با یک فاز خلاء شروع می‌شود تا اطمینان حاصل شود که هیچ گازی به صورت به دام افتاده باقی نمانده است.
- ✓ سپس مایع عایقی به تجهیز وارد می‌شود.
- ✓ قسمت اصلی اشباع در مرحله بعد و با اعمال یک فشار ثانوی محقق می‌شود.



شمای فرآیند تزریق روغن عایقی و اشباع یک خازن

فرآیند اشباع

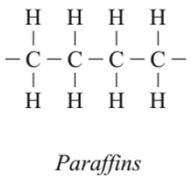
- ✓ در صورتی که محفظه به دلایل مکانیکی نتواند به صورت کامل خلاء شود، در رابطه با مواد فیبرگونه همچنان به دلیل اثر مویی (capillary) اشباع صورت می‌گیرد.
- ✓ در این حالت بایستی سطح مایع به حدی کند افزایش پیدا کند که حجم زیادی از گاز به دام نیفتد.
- ✓ حتی بعد از اشباع نیز حباب‌های گاز در صورتی که با مقدار قابل توجهی از مایع در تماس باشد، می‌توانند در اثر دیفیوژن در مایع حل شوند.
- ✓ به کمک اندازه‌گیری تخلیه جزئی با حساسیت بالا می‌توان از اشباع بدون حباب مطمئن شد. البته به دلیل کند بودن فرآیند دیفیوژن و همچنین خروج حباب‌ها از مایع، این کار بایستی با فاصله زمانی چند روز از اشباع انجام شود.
- ✓ در تجهیزات بزرگ، مایع عایقی بایستی در فواصل معین رصد وضعیت شود و پارامترهایی چون رطوبت و همچنین تخلیه ثبت شده و وضعیت پیری بر اساس آن تخمین زده شود. پارامترهایی که لازم است کنترل شود بسته به کاربرد و نوع مایع عایقی دارد.

روغن معدنی

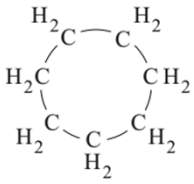
- ✓ روغن معدنی معمول‌ترین ماده عایقی است که در فشارقوی استفاده می‌شود.
- ✓ به عنوان روغن با گران‌روی پایین در کاربردهای مختلفی استفاده می‌شود نظیر پر کردن ترانسفورماتور، اشباع کابل‌های روغنی، خازن‌ها، ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری، بوشینگ و همچنین تجهیزات فشارقوی فشرده (مثل منابع ضربه، منابع تغذیه لیزرها و دستگاه تولید اشعه X)
- ✓ روغن‌های معدنی کلاسیک از نفت خام با پالایش و هیدروژنیزه کردن به دست می‌آیند. همچنین در صورت لزوم موارد بازدارنده (inhibitor) به آن‌ها اضافه می‌شود.
- ✓ ماده پایه روغن می‌تواند در چهار گروه تقسیم‌بندی شود: پارافین‌ها، نفتان‌ها، ترکیبات آروماتیک و الفین‌ها

روغن معدنی

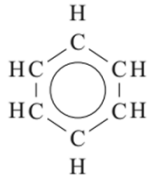
- ✓ پارافین مولکول‌های زنجیری بدون پیوند دوتایی هستند. همچنین ممکن است زنجیره‌های مستقل کوچکتری باشند که با یکدیگر پیوند برقرار کرده‌اند.
- ✓ نفتان‌ها هیدروکربن‌های حلقوی بدون پیوند دوتایی هستند.
- ✓ ترکیبات آروماتیک، هیدروکربن‌های با حلقه بنزنی هستند.
- ✓ الفین‌ها مولکول‌های زنجیری یا حلقوی هستند که پیوند دوتایی نیز دارند.



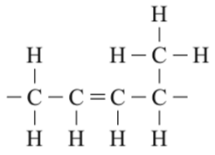
Paraffins



Naphthenes



Aromatics (benzene ring)



Olefines

مشخصات انواع روغن‌های معدنی

- ✓ زنجیره بلند پارافین مانع از جاری شدن روغن در دمای پایین می‌شود. بنابراین روغن‌هایی که برای کار در دمای پایین مناسب هستند، درصد بیشتری نفتان دارند.
- ✓ الفین‌ها به دلیل وجود پیوند دوتایی از لحاظ شیمیایی آسیب‌پذیرند و در نتیجه پایداری روغن در اثر پیری را به شدت کاهش می‌دهند. بنابراین الفین‌ها نبایستی به مقدار زیاد در روغن عایقی وجود داشته باشند.
- ✓ ترکیبات آروماتیک نیز باعث پیری تسریع‌شده در معرض اکسیژن و یا نور می‌شوند. این ترکیبات می‌تواند در اثر اکسیدشدن به مولکول قطبی تبدیل شوند و یا می‌توانند یون‌ها یا مولکول‌های دیگر را اضافه کنند. همچنین می‌توانند با باز شدن پیوند دوتایی واکنش شیمیایی دهند و حتی به یکدیگر متصل شوند.

مشخصات انواع روغن‌های معدنی

- ✓ ترکیبات آروماتیک از سوی دیگر خاصیت مناسب جذب گاز دارند به این معنی که مولکول‌های آن می‌توانند هیدروژن را که در اثر تخلیه جزئی ایجاد می‌شود جذب کنند.
- ✓ روغن‌های آروماتیک جاذب گاز، در تجهیزاتی که به صورت هرمتیک آب‌بندی شده‌اند و تنش الکتریکی بالایی دارند استفاده می‌شوند (برای مثال، خازن‌ها و یا بوشینگ‌ها با تنش میدانی بالا در لبه فویل‌های فلزی).
- ✓ برای کاربرد ترانسفورماتور که هوا به درون آن نفوذ می‌کند، در دمای بالاتری کار می‌کند و به دلیل اثر کاتالیستی فلزات هادی‌ها، روغن‌هایی که به صورت ویژه در مقابل پیری مقاوم هستند ترجیح دارند.
- ✓ مقاومت در برابر پیری توسط روغن‌های با پایه نفتان (نفتانیک) و بازدارنده‌های شیمیایی حاصل می‌شود.

آزمون‌های روغن نو

- ✓ پیش از تزریق روغن به ترانسفورماتور و همچنین در هنگامی که روغن نو تحویل گرفته می‌شود، لازم است که نمونه‌ای از روغن موجود در بشکه‌ها گرفته شده و تطابق آن با نیازمندی‌ها کنترل شود. انجام این آزمون‌ها فارغ از اینکه روغن مدت طولانی در محل پست انباره شده باشد یا تنها زمان کوتاهی از دریافت آن گذشته باشد، الزامی است.
- ✓ در صورتی که روغن درون ترانسفورماتور حمل شده باشد و با آن تحویل گرفته شود، بایستی نمونه روغن از ترانسفورماتور گرفته شود. همچنین، پیش از برق‌دار کردن ترانسفورماتور و پس از پر کردن آن از روغن، نمونه روغن بایستی گرفته شده و مورد آزمون قرار گیرد.

آزمون‌های روغن نو

جدول (۱-۱): آزمون‌ها و محدوده مجاز برای روغن نو مطابق استاندارد IEC 60296 [۱۳]

مشخصه	روش آزمون	محدوده مجاز
گران‌روی در $40\ ^0C$	ISO 3104	Max. 12 mm^2/s
گران‌روی در $-30\ ^0C$ (الف)	ISO 3104	Max. 1800 mm^2/s
نقطه روان‌شدن (Pour point)	ISO 3016	Max. $-40\ ^0C$
میزان رطوبت	IEC 60814	Max. 30 mg/kg(ب) Max 40 mg/kg(پ)
ولتاژ شکست	IEC 60156	Min. 30 kV/70 kV(ت)
چگالی در $20\ ^0C$	ISO 3675 یا ISO 12185	Max. 0.895 g/ml
ضریب تلفات عایقی در $90\ ^0C$	IEC 60247 یا IEC 61620	Max. 0.005
میزان ذرات (Particle content)	IEC 60970	مطابق مشخصات توافق شده
وضعیت ظاهری	-	شفاف، بدون ذرات معلق، رسوب و ته‌نشین
اسیدیته	IEC 62021-1 یا IEC62021-2	Max. 0.01 mg KOH/g
کشش سطحی (نیروی بین سطحی)	EN 14210 یا ASTM D971	فاقد نیازمندی کلی(ث)

آزمون‌های روغن نو

دانشگاه تهران

مجموع میزان سولفور	ISO 14596 یا IP 373	فاقد نیازمندی کلی
سولفور خورنده	DIN 51353	غیرخورنده
سولفور با قابلیت خورندگی (Potentially corrosive sulphur)	IEC 62535	غیرخورنده
DBDS (د)	IEC 62697-1	غیر قابل تشخیص (< 5 mg/kg)
بازدارنده‌ها (Inhibitors) IEC 6066	IEC 60666	(U) روغن بدون بازدارنده: غیر قابل تشخیص (< 0.01%) (T) روغن با بازدارندگی قابل ردیابی: < 0.08 % (I) روغن‌های دارای بازدارنده: 0.08 % - 0.40 %
افزودنی‌های منفعل‌کننده فلز (Metal passivator additives) ((IEC 60666)	IEC 60666	غیر قابل تشخیص (< 5 mg/kg) یا مطابق مشخصات توافق‌شده
فورفورال و ترکیبات وابسته	IEC 61198	غیر قابل تشخیص (< 0.05 mg/kg

محمد حامد صمیمی

آزمون‌های روغن نو

دانشگاه تهران

پایداری در برابر اکسیداسیون	IEC 61125:1992 (Method C) زمان‌های آزمون (U) روغن بدون بازدارنده: ۱۶۴ ساعت (T) روغن با بازدارندگی قابل ردیابی: ۳۳۲ ساعت (I) روغن‌های دارای بازدارنده: ۵۰۰ ساعت	برای روغن‌های با سایر افزودنی‌های آنتی‌اکسیدان و metal passivator به قسمت 6.12 استاندارد مراجعه شود.
مجموع اسیدیته (ج)	IEC 61125:1992 (1.9.4)	Max. 1.2 mg KOH/g
لجن (ج)	IEC 61125:1992 (1.9.1)	Max. 0.8%
ضریب تلفات عایقی در 90 °C (ج)	IEC 61125 (1.9.6), Amedment 1 (2004) + IEC 60247	Max. 0.500 (ج)
تمایل به گاز (Gassing tendency) (ج)	IEC 60628:1985, Method A	مطابق مشخصات توافق‌شده
ECT تمایل به تولید الکتریسیته ساکن (ج)	-	فاقد نیازمندی کلی
نقطه اشتعال (Flash point)	ISO 2719	Min. 135 °C
میزان PCA	IP 346	Max. 3%
میزان PCB	IEC 61619	غیر قابل تشخیص (< 2 mg/kg)

20

محمد حامد صمیمی

نکات هنگام سفارش روغن نو

- ✓ مشخصات تعیین‌شده توسط استاندارد IEC به عنوان مشخصات روغن تعیین گردد.
- ✓ با توجه به اینکه اکثریت روغن‌های موجود در کشور پایه نفتانیک دارند و همچنین به دلیل مشخصات فنی بهتر روغن‌های نفتانیک، تهیه روغن‌های با پایه نفتانیک ارجحیت دارد. به این ترتیب بعدا می‌توان از همین روغن برای سرریز ترانسفورماتورهای با روغن مشابه نیز استفاده کرد.
- ✓ اکیدا توصیه می‌گردد تا در هنگام خرید روغن تاییدیه (certificate) مربوط به مشخصات درخواستی از فروشنده دریافت شود.
- ✓ بهتر است در هنگام خرید، جریمه‌ای برای عدم هماهنگی هر یک از مشخصات روغن درخواستی در نظر گرفته شود.
- ✓ در صورت وجود شک (یا به طور کلی)، مناسب است با تمایل کارفرما برخی آزمایش‌ها جهت کنترل مشخصات روغن تحویل‌شده با مشخصات تعیین‌شده انجام شود.

فرآیند تولید روغن عایقی

- ✓ بعد از پالایش در دمای 180 تا 200 °C بسته به نوع و منشاء روغن، نفتان‌ها و پارافین‌های خاص همراه با مقدار قابل توجهی ترکیبات آروماتیک در روغن معدنی وجود دارد (حدود 20%).
- ✓ با فرآیند هیدروژنیزه کردن، پیوندهای دوتایی ترکیبات آروماتیک می‌تواند با اضافه شدن هیدروژن اشباع شود و به نفتان‌های با پایداری بیشتر تبدیل شود. برای این فرآیند فشاربخار ۵۰ تا بیش از ۱۰۰ بار در دمای بالا ایجاد می‌شود و فرآیند توسط کاتالیزورها تسریع می‌شود.
- ✓ برای افزایش استقامت در برابر پیری، ترکیبات شیمیایی بازدارنده می‌توانند اضافه شوند اما این ترکیبات به مرور زمان تحلیل می‌روند خصوصا در اثر حضور اکسیژن.
- ✓ از آنجا که روغن عایقی از روغن معدنی طبیعی تهیه می‌شود، مقدار بسیار کمی سولفور نیز در آن وجود دارد که خورنده است و می‌تواند هادی‌ها را تخریب کند. از این رو امروزه به طور معمول سولفور از روغن جدا می‌شود.

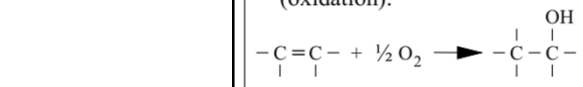
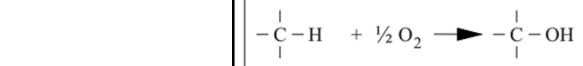
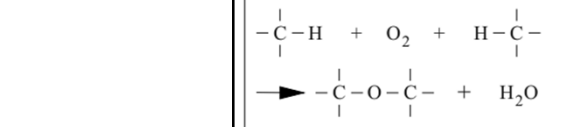
پیری روغن معدنی

- ✓ فرآیند پیری روغن معدنی به طور عمده به خاطر فرآیندهای اکسیداسیون است که نیاز به حضور اکسیژن و همچنین تاثیر گرما، تابش و یا تخلیه جزئی دارد.
- ✓ مس مثل یک کاتالیزور فرآیند را تسریع می‌کند و بنابراین نبایستی به صورت هادی برهنه در معرض روغن قرار بگیرد.
- ✓ در اثر پیری، ضریب تلفات عایقی به صورت غیر قابل برگشتی بزرگ می‌شود که علت آن ورود گروه‌های قطبی OH به مولکول‌ها است.
- ✓ همچنین اسیدها و لجن روغن که غیر قابل انحلال است ایجاد می‌شود.
- ✓ روغن به دلیل کراس‌لینک‌هایی که از طریق اکسیژن ایجاد می‌شود حالت رزینی پیدا می‌کند.
- ✓ در این فرآیندها آب تولید شده و استقامت الکتریکی را کاهش می‌دهد.

موم x

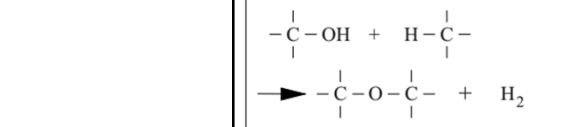
- ✓ یکی از موارد خاصی که در آن استقامت الکتریکی روغن به نحو خطرناکی کاسته می‌شود، ایجاد مومی به نام x-wax است (نام x به دلیل مجهول بودن در ابتدا برای آن انتخاب شده است).
- ✓ تحت تاثیر تخلیه جزئی یا شدت‌های بسیار بالا از میدان متناوب، هر گونه اکسیژن موجود مولکول روغن را اکسید می‌کند.
- ✓ تحت تنش طولانی مدت این مولکول‌ها کراس لینک شده و یک نوع موم غیر قابل حل در روغن ایجاد می‌شود. همراه با این فرآیند هیدروژن نیز تولید می‌شود. قسمت گازی می‌تواند جدا شده و استقامت الکتریکی را به صورت کلی تضعیف کند.
- ✓ موم x به عنوان مثال در این موارد مشاهده می‌شود: در کابل‌های قدیمی روغن، در لبه‌های فلزی در خازن‌های متناوب و ولتاژ ضربه و همچنین در سیستم‌های عایقی که به صورت کامل اشباع نشده‌اند.

فرآیند پیری روغن در اثر اکسیداسیون

Mechanism	*Consequences*	*Measures *)*
a) Breaking double bonds and addition of polar groups (oxidation): 	Dissipation factor irreversibly increases due to polarization losses. Cross-linking and gumming.	Use of oils with low percentage of unsaturated hydrocarbons (olefines). *) see below
b) Oxidation of oil molecules (effect of PD, UV or light): 	Dissipation factor increases due to polarization losses. Decomposition products, acids, oil sludge.	Regeneration through fuller's earth treatment is only possible to a limited extend. *) see below
c) Oxidation and polycondensation (effect of PD, UV or light): 	The breakdow strength reduces due to the synthesis of water, conductivity and dissipation factor increase, see Figures 3.3-4, 4.2-5 und 4.2-10. Cross-linking leads to formation of oil sludge and gumming.	By drying of oil, breakdown strength, conductivity and dissipation factor can (partially) be regenerated. *) see below

محمد حامد صمیمی

فرآیند پیری روغن در اثر اکسیداسیون

Mechanism	*Consequences*	*Measures *)*
d) X-wax formation (high alternating field strengths, effect of PD): 1.) Bonding of oxygen through oxidation of oil molecules, see b). 2.) Subsequent cross-linking: 	Irreversible increase in polarization losses due to oxidation. Gumming, formation of X-wax, decrease in volume and gas formation (hydrogen) through cross-linking.	Paritial discharge free design. Void-free impregnation. Use of gas-absorbing oils. *) see below
*) General measures:	Closure against influx of air or access to oxygen and moisture, as well as measures against the effects of PD, UV, light and catalysts (copper). Application of inhibitors which break the oxidation chain.	

محمد حامد صمیمی

مسائل روغن معدنی

- ✓ احیاء روغن معدنی پیرشده تا حدی میسر است. گازهای حل شده و رطوبت می‌تواند با فرآیند خشک‌سازی و جداسازی گاز به طور کامل حذف شود.
- ✓ بخشی از ترکیبات قطبی که تلفات را افزایش می‌دهند می‌توانند با استفاده از ترکیبات خاص جذب شوند (خاک رنگ‌بر و آلومینیوم سیلیکات).
- ✓ ایجاد موم X و همچنین تبدیل به رزین قابل برگشت نیستند.

مسائل روغن معدنی

- ✓ پیری روغن عایقی در ترانسفورماتورهایی که تنش حرارتی بالایی دارند و روغن در آن‌ها در تماس با اکسیژن هوا در مخزن انبساط است، یک مشکل جدی محسوب می‌شود.
- ✓ راهکارهای پیش‌گیرانه عبارتند از پوشاندن هادی‌های مسی، استفاده از روغن با مقاومت بالا در مقابل پیری که ترکیبات آروماتیک کمی دارند، و همچنین استفاده از بازدارنده‌ها.
- ✓ بازدارنده‌ها چرخه اکسیداسیون را قطع کرده و به مولکول روغن جذب می‌شوند. بازدارنده‌ها در طول زمان مصرف شده و بایستی تجدید شوند.
- ✓ روغن در تجهیزاتی که به صورت هرمتیک آب‌بندی شده‌اند مثل بوشینگ، خازن، ترانسفورماتورهای هرمتیک، در معرض خطر پیری کمتری هستند و در نتیجه امکان استفاده از روغن‌های جاذب گاز با مقدار بالایی از ترکیبات آروماتیک وجود دارد.

روغن‌های عایقی مصنوعی

- ✓ روغن‌های مصنوعی یا ساختگی به دلیل ویژگی‌هایی که در روغن‌های معدنی وجود ندارد به کار گرفته می‌شوند.
- ✓ مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:
  - ✓ PCB یا آسکارل
  - ✓ روغن سیلیکون
- ✓ PCB یا Polychlorinated biphenyls به عنوان ماده ضدآتش و همچنین خنک‌کننده در ترانسفورماتور استفاده می‌شده است. همچنین به عنوان ماده اشباع کننده با گذردهی بالاتر در خازن استفاده می‌شده است.
- ✓ در معرض حرارت بالا ترکیبات بسیار سمی تولید می‌کند و در نتیجه تولید و استفاده از آن سالها قبل متوقف و ممنوع شده و تجهیزات دارای این روغن با روغن‌های غیرخطرناک جایگزین شده‌اند.

روغن سیلیکون

- ✓ ساختار مایع سیلیکون که به آن روغن سیلیکون می‌گویند پیش‌تر توضیح داده شد.
- ✓ از جمله ویژگی‌های روغن سیلیکون دمای اشتعال (fire point) بالا (بیش از ۳۳۵ درجه) است که تقریبا دو برابر مقدار آن برای روغن معدنی است.
- ✓ در مقایسه با روغن معدنی از لحاظ شیمیایی بسیار پایدار هستند و در نتیجه در مقابل پیری مقاوم هستند اما ضریب انبساط بزرگ‌تری دارند. از لحاظ زیست تخریب پذیر بودن نیز وضعیت بسیار بهتری دارند.
- ✓ گذردهی نسبی آن اندکی بالاتر و ضریب تلفات عایقی آن که در محدوده بزرگی از فرکانس و دما تغییرات اندکی دارد، بسیار کم است ($\tan\delta=1 .. 2\times10^{-4}$).
- ✓ استقامت عایقی آن از روغن معدنی کمتر است و این یک نقطه ضعف برای کاربرد ترانسفورماتور قدرت محسوب می‌شود. رطوبت اثر مشابه در کاهش استقامت عایقی دارد.
- ✓ به دلیل هزینه بالا فقط در شرایط خاص مثل تنش حرارتی بالا یا جلوگیری از آتش‌سوزی از روغن سیلیکون استفاده می‌شود. به عنوان پوشش البته به صورت خمیری برای آب‌گریز کردن سطح مقره پرسلانی هم می‌تواند استفاده شود (عملکرد مناسب آن محدودیت زمانی دارد).

روغن‌های گیاهی و استر طبیعی

- ✓ در ابتدای دوران مهندسی فشارقوی از روغن صمغ به عنوان عامل اشباع کننده در ترانسفورماتورها استفاده می‌شده است. به دلیل عدم مقاومت در مقابل پیری و تمایل به تبدیل شدن به چسب به زودی با روغن معدنی جایگزین شدند. با این وجود هنوز کاربردهایی برای روغن گیاهی به عنوان عایق وجود دارد.
- ✓ اخیرا علاقه بسیارزیادی به مایعات استر طبیعی وجود دارد که از مواد خام تجدید پذیر مثل روغن هسته‌های گیاهی تولید می‌شود و خواص بسیار مناسبی مثل زیست تخریب پذیری، مقاومت در برابر اشتعال، عدم خطر برای آب، گران‌روی پایین، مشخصات مناسب الکتریکی و عایقی و همچنین پایداری کافی در برابر پیری اشاره کرد.

روغن‌های گیاهی (Vegetable Oils)

- ✓ روغن کرچک یکی از مواد عایقی مهم برای خازن‌های ولتاژ DC و همچنین ولتاژ ضربه بوده است.
- ✓ گذردهی بالای 4.5 یکی از مزایای آن در ذخیره انرژی بیشتر در خازن است. همچنین خازن‌های ضربه روغن کرچک با کاغذ عمری تقریبا ده برابر خازن‌های با عایق روغن معدنی و کاغذ دارند. (کاهش میدان الکتریکی در لبه فویل‌ها به دلیل گذردهی بالاتر علت این امر دانسته شده است.)
- ✓ ضریب تلفات عایقی روغن کرچک تقریبا ۵ برابر روغن معدنی است و مشخصات عایقی آن هم وابستگی بالایی به دما دارد. به این دلیل در کاربردهای ولتاژ AC استفاده نمی‌شود.
- ✓ به دلیل گران‌روی بالا، اشباع‌سازی فقط در دمای بالا امکان پذیر است.
- ✓ در دمای 10- تا C 18- تبدیل به جامد می‌شود و بنابراین در دمای پایین قابل استفاده نیست.

مایعات استر طبیعی (Natural Ester Liquids)

- ✓ روغن گیاهی خالص مشکلاتی نظیر گران روی بالا و عدم مقاومت کافی در برابر پیری دارد که می‌توان به کمک روغن‌های که با نام استر طبیعی شناخته می‌شوند به آن‌ها غلبه کرد.
- ✓ گرچه از نام طبیعی استفاده می‌شود اما این روغن‌ها طبیعی نیستند بلکه مواد اولیه آن‌ها طبیعی هستند. از روغن دانه‌هایی مثل سویا و آفتاب‌گردان طی فرآیندهای شیمیایی تولید می‌شوند. محصول نهایی انواع مختلفی از ترکیبات شیمیایی را دارد.
- ✓ بسته به ماده اولیه و نحوه تکنولوژی، مشخصات استرهای طبیعی می‌تواند در محدوده گسترده‌ای باشد. برای گران‌روی پایین و مشخصات عملکردی مناسب در دمای پایین با درصد زیادی از اسیدهای چرب غیراشباع حاصل می‌شود. مقاومت در برابر اکسیداسیون بالاتر با درصد بالایی از اسیدهای اشباع میسر است.

مایعات استر طبیعی (Natural Ester Liquids)

- ✓ با انتخاب مناسب دانه‌های مختلف و افزودنی‌های مناسب می‌توان به روغن‌هایی دست یافت که بی‌خطر برای محیط زیست، ایمن در مقابل اشتعال، سازگار با مواد عایقی درون ترانسفورماتور، دارای مقاومت کافی در برابر اکسیداسیون بوده و گران‌روی پایین، نقطه انجماد پایین و همچنین مشخصات الکتریکی مناسب داشته باشند.
- ✓ امروزه به طور گسترده در ترانسفورماتورهای توزیع استفاده می‌شود. کاربرد در ترانسفورماتورهای قدرت و پرکردن ترانسفورماتور قدیمی با روغن استر ممکن است و تست هم شده است.
- ✓ یکی از انواع این روغنها FR3 نام دارد که شرکت‌های مختلفی ترانسفورماتورهای قدرت به صورت پایلوت با این روغن تولید کرده و چندین سال است که بدون مشکل در حال رصد وضعیت هستند.

مقایسه استر طبیعی و روغن معدنی

- ✓ استر طبیعی کاملا معادل روغن معدنی نیست و تفاوت‌هایی دارد. در مقایسه با روغن معدنی موارد زیر را می‌توان بیان کرد:
- ✓ استقامت الکتریکی در همان حدود است اما حساسیت بیشتری به سطح الکترود وجود دارد.
- ✓ ضریب تلفات (در حد چند درصد در ۹۰ درجه) و اسیدیته بالاتر است و به نحو قابل توجهی طی فرآیند پیری افزایش می‌یابد.
- ✓ استر طبیعی در مقابل اکسیداسیون مقاومت کمتری دارد. لزوم حفاظت
- ✓ مقدار آب بیشتری در خود حل می‌کنند. احتیاج به دیاگرام‌های تعادلی جدید
- ✓ گران‌روی بالاتر است و در انتقال گرما به روش هم‌رفت ضعیف‌تر است.
- ✓ دمای انجماد بالاتر است بنابراین محدوده دمایی باید با دقت انتخاب شود
- ✓ دمای اشتعال بالاتر است.
- ✓ استر طبیعی بسیار راحت تر از روغن معدنی در طبیعت تجزیه می‌شود.

پارامترهای روغن	مشکلات ترانسفورماتور								
	اضافه حرارت			تخلیه جزئی			آسیب به آب‌بندی		
	در هسته	اتصالات	سیم‌پیچ/ مشکلات خنک‌سازی	روغن	کاغذ	سطح کاغذ و روغن	مشکل در ممبران	نشتی روغن	نفوذ رطوبت
اسیدیته/ IFT	H 1, 2	H 1, 2	H 1, 2	L	L	L	L 2	L	H 2
رنگ	H 1, 2	H 1, 2	H 1, 2	L	L	L	L 2	L	L
محتوای رطوبت	L	L	H 5, 6	L	H 5, 6	H 5, 6	L-M 6	M	H 8
ولتاژ شکست	L	M 3, 12	H 4, 6, 12	H 11	M	H 5, 6, 12	M 6	M 7	H 8
tanδ	H 1, 2	H 1, 2	H 1, 2	L	L	L	L 2	L	H 9
محتوای گاز	H 1, 10	H 1, 10	H 1, 10	H 1, 10	H 1, 4, 10	H 1, 4, 10	H 7	M 10	L 7

تاثیر مشکل بر روی پارامتر روغن	مشکلات ترانسفورماتور		
H = تاثیر زیاد	۱- تخریب روغن	۵- پیری کاغذ	۹- آب، رسوب
M = تاثیر متوسط	۲- پیری روغن	۶- تولید آب	۱۰- تولید گاز
L = تاثیر کم	۳- کربنیزه شدن روغن	۷- هوای حل‌شده	۱۱- حباب
	۴- تخریب کاغذ	۸- رطوبت آزاد	۱۲- ذرات