

# مواد عایقی مایع

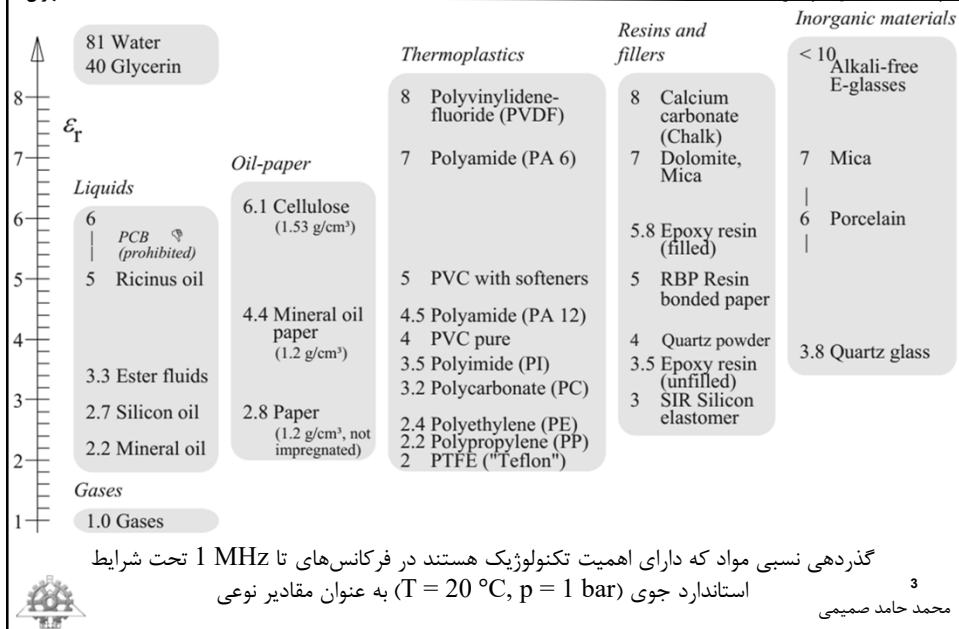


## تقسیم‌بندی مواد عایقی

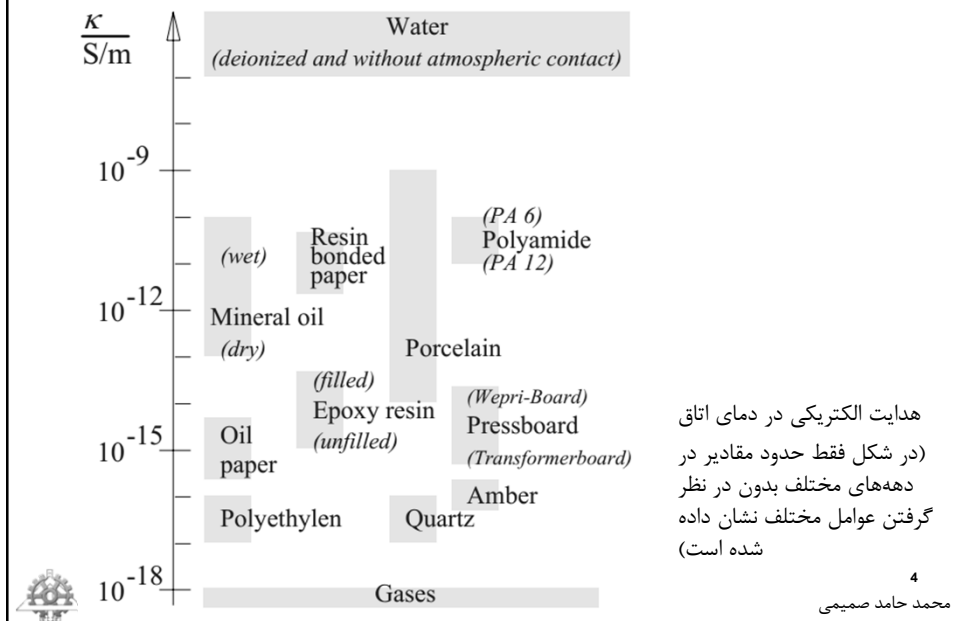
- ✓ تقسیم‌بندی از دیدگاه‌های مختلفی امکان‌پذیر است مثل حالت ماده، ساختار شیمیایی، تکنولوژی ساخت، محدوده کاربرد ....
- ✓ تقسیم‌بندی فعلی بر اساس مشخصات مهم و کاربردها در مهندسی فشارقوی است.
  - ✓ ۱- گازها: هوا، SF<sub>6</sub>، گازهای جایگزین
  - ✓ ۲- مواد عایقی جامد غیرارگانیک: سرامیک، پرسیلان، شیشه، 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 الاستومرها (elastomer): اپوکسی رزین، پلی‌اورتان، الاستومرهای سیلیکونی
  - ✓ ۴- مواد عایقی مایع: روغن معدنی، مایعات سنتتیک، روغن‌های گیاهی
  - ✓ ۵- مواد با ساختار فیبرگونه: کاغذ، پرس‌بورد، مواد سنتتیک

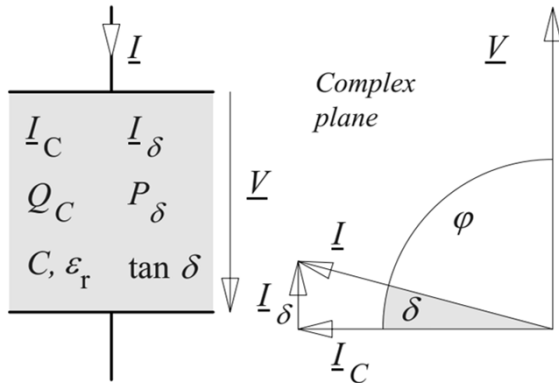


### میزان گذردهی نسبی عایق‌های مختلف



### میزان هدایت الکتریکی عایق‌های مختلف





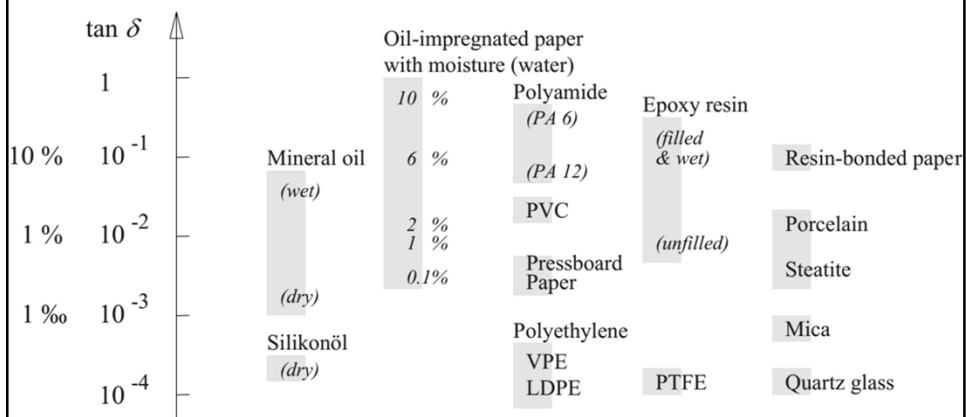
$$\tan \delta = \frac{I_{\delta}}{I_C}$$

$$P_{\delta} = V \cdot I_{\delta}$$

$$Q_C = V \cdot I_C$$

$$\tan \delta = \frac{P_{\delta}}{Q_C}$$

✓ ضریب تلفات عایقی به ابعاد بستگی ندارد اما به پارامترهایی مثل دما وابسته است.



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



## وظایف مایع عایقی



دانشگاه  
تهران

- ✓ اصلی ترین 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 قدیم‌تر تپ‌چنجر تحت بار در روغن کار می‌کنند.

8

محمد حامد صمیمی



## تکنولوژی عایق‌های مایع



دانشگاه  
تهران

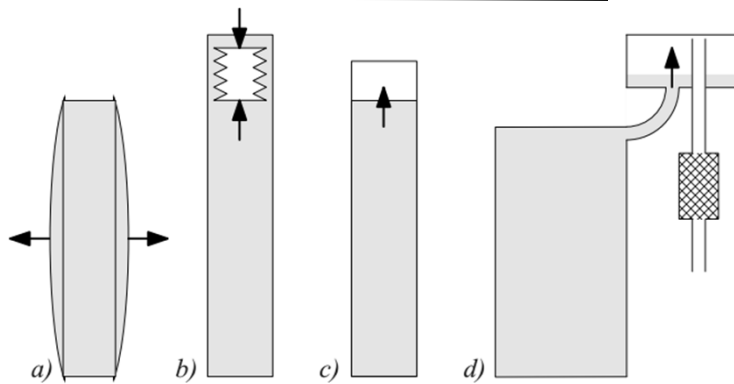
- ✓ در زمینه کاربرد عایق مایع، بایستی در زمینه‌های کار با آن، طراحی تجهیز، فرآیند اشباع و همچنین رصد وضعیت (condition monitoring) آن دقت کافی به عمل آید.
- ✓ در زمینه طراحی تجهیز بایستی انبساط حرارتی مایع عایقی و سایر مواد موجود لحاظ شود. ضریب افزایش حجمی مایع‌های عایقی در حدود 7 تا  $10 \times 10^{-4}/K$  است. بنابراین برای 100 درجه تغییر دما، حجم حدود 7% تا 10% افزایش خواهد یافت.
- ✓ در تجهیزات کوچک مثل خازن یا ترانسفورماتور توزیع معمولاً 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)

9

محمد حامد صمیمی



- ✓ البته آخرین راهکار باعث کاهش استقامت الکتریکی به دلیل حل شدن گاز در روغن می‌شود.
- ✓ تجهیزاتی که از آخرین راهکار استفاده می‌کنند (بوشینگ، خازن‌ها یا ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری) نبایستی از حالت ایستاده (عمودی) کج شوند و یا فقط بایستی به مقداری کج شوند که گاز نتواند به قسمت‌های اشباع شده (active part) برسد و در آن‌جا باقی بماند. این موضوع معمولاً در هنگام حمل نیز بایستی در نظر گرفته شود.
- ✓ ترانسفورماتورهای بزرگ معمولاً به کمک یک مخزن انبساط، تغییرات حجم را کنترل می‌کنند که این منبع با جواز طریق یک خشک‌کننده در تماس است.

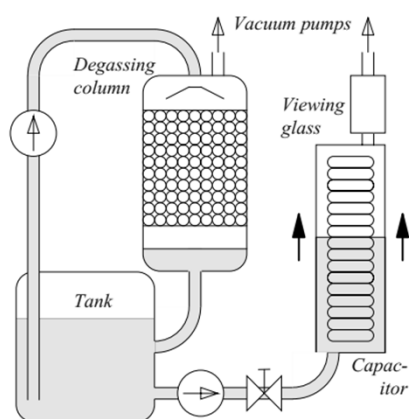


✓ روش‌های جبران‌سازی انبساط حرارتی عایق‌های مایع:

- (a) آب‌بندی هرمتیک مخزن با سطح مقطع مستطیلی
- (b) محفظه آب‌بندی هرمتیک با سلول انبساط فلزی (آکاردئون)
- (c) محفظه آب‌بندی با بالشتک هوا
- (d) محفظه باز با مخزن انبساط (کنسرواتور) و خشک‌کننده



- ✓ پیش از پر کردن یک تجهیز بایستی روغن هم خشک شده و هم از گازی 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 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

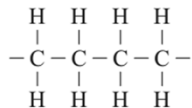


- ✓ در صورتی که محفظه به دلایل مکانیکی نتواند به صورت کامل خلاء شود، در رابطه با مواد فیبرگونه همچنان به دلیل اثر موئی (capillary) اشباع صورت می‌گیرد.
- ✓ در این حالت بایستی سطح مایع به حدی کند افزایش پیدا کند که حجم زیادی از گاز به دام نیفتد.
- ✓ حتی بعد از اشباع نیز حباب‌های گاز در صورتی که با مقدار 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.

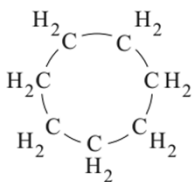


- ✓ روغن معدنی معمول‌ترین ماده عایقی است که در فشارقوی استفاده می‌شود.
- ✓ به عنوان روغن با گران‌روی پایین در کاربردهای مختلفی استفاده می‌شود نظیر پر کردن ترانسفورماتور، اشباع کابل‌های روغنی، خازن‌ها، ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری، پوشینگ و همچنین تجهیزات فشارقوی فشرده (مثل منابع ضربه، منابع تغذیه لیزرها 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

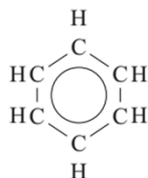




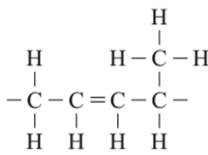
Paraffins



Naphthenes



Aromatics (benzene ring)



Olefines

✓ 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.



✓ 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 ناپیستی به مقدار زیاد در روغن عایقی وجود داشته باشند.

✓ ترکیبات آروماتیک نیز باعث پیری تسریع‌شده در معرض اکسیژن و یا نور می‌شوند. این ترکیبات می‌توانند 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.





- ✓ 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.



- ✓ 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 انبار 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.



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

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

محمد حامد صمیمی

فاقد نیازمندی کلی	ISO 14596 یا IP 373	مجموع میزان سولفور
غیرخورنده	DIN 51353	سولفور خورنده
غیرخورنده	IEC 62535	سولفور با قابلیت خوردگی (Potentially corrosive sulphur)
غیر قابل تشخیص (< 5 mg/kg)	IEC 62697-1	DBDS <sup>(۱)</sup>
(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 %	IEC 60666	بازدارنده‌ها (Inhibitors) IEC 6066
غیر قابل تشخیص (< 5 mg/kg) یا مطابق مشخصات توافق شده	IEC 60666	افزودنی‌های منفعل‌کننده فلز (Metal passivator additives) (IEC 60666)
غیر قابل تشخیص (< 0.05 mg/kg)	IEC 61198	فورفورال و ترکیبات وابسته

محمد حامد صمیمی

## آزمون‌های روغن نو



دانشگاه  
تهران

برای روغن‌های با سایر افزودنی‌های آنتی‌اکسیدان و metal passivator به قسمت 6.12 استاندارد مراجعه شود.	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	پایداری در برابر اکسیداسیون
Max. 1.2 mg KOH/g	IEC 61125:1992 (1.9.4)	مجموع اسیدیته (۲)
Max. 0.8%	IEC 61125:1992 (1.9.1)	لجن (۳)
(۴) Max. 0.500	IEC 61125 (1.9.6), Amedment 1 (2004) + IEC 60247	ضریب تلفات عایقی در 90 °C (۵)
مطابق مشخصات توافق شده	IEC 60628:1985, Method A	تمایل به گاز (Gassing tendency) (۶)
فاقد نیازمندی کلی	-	ECT تمایل به تولید الکتریسیته ساکن (۷)
Min. 135 °C	ISO 2719	نقطه اشتعال (Flash point)
Max. 3%	IP 346	میزان PCA
غیر قابل تشخیص (< 2 mg/kg)	IEC 61619	میزان PCB

22

محمد حامد صمیمی



دانشگاه  
تهران

## نکات هنگام سفارش روغن نو

- ✓ مشخصات تعیین شده 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 بعداً 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 تحویل شده با مشخصات تعیین شده انجام شود.

23

محمد حامد صمیمی

- ✓ بعد از پالایش در دمای 180 تا 200 °C بسته به نوع و منشأ روغن، نفتان‌ها و پارافین‌های خاص همراه با مقدار قابل توجهی ترکیبات آروماتیک در روغن معدنی وجود دارد (حدود 20%).
- ✓ با فرآیند هیدوژنیزه کردن، پیوندهای دوتایی ترکیبات آروماتیک می‌تواند با اضافه شدن هیدروژن اشباع شود و به نفتان‌های با پایداری بیشتر تبدیل شود. برای این فرآیند فشاربخار 50 تا بیش از 100 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 خصوصاً 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.



- ✓ 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.



- ✓ 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.



Mechanism	Consequences	Measures *)
<p>a) Breaking double bonds and addition of polar groups (oxidation):</p> $-\text{C}=\text{C}- + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \begin{array}{c}   \\ \text{OH} \\   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \end{array}$	<p>Dissipation factor irreversibly increases due to polarization losses.</p> <p>Cross-linking and gumming.</p>	<p>Use of oils with low percentage of unsaturated hydrocarbons (olefines).</p> <p>*) see below</p>
<p>b) Oxidation of oil molecules (effect of PD, UV or light):</p> $-\text{C}-\text{H} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \begin{array}{c}   \\ -\text{C}-\text{OH} \\   \end{array}$	<p>Dissipation factor increases due to polarization losses.</p> <p>Decomposition products, acids, oil sludge.</p>	<p>Regeneration through fuller's earth treatment is only possible to a limited extend.</p> <p>*) see below</p>
<p>c) Oxidation and polycondensation (effect of PD, UV or light):</p> $\begin{array}{c}   \\ -\text{C}-\text{H} \\   \end{array} + \text{O}_2 + \begin{array}{c}   \\ \text{H}-\text{C}- \\   \end{array} \longrightarrow \begin{array}{c}   \quad   \\ -\text{C}-\text{O}-\text{C}- \\   \quad   \end{array} + \text{H}_2\text{O}$	<p>The breakdown 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.</p> <p>Cross-linking leads to formation of oil sludge and gumming.</p>	<p>By drying of oil, breakdown strength, conductivity and dissipation factor can (partially) be regenerated.</p> <p>*) see below</p>



Mechanism	Consequences	Measures *)
<p>d) X-wax formation (high alternating field strengths, effect of PD):</p> <p>1.) Bonding of oxygen through oxidation of oil molecules, see b).</p> <p>2.) Subsequent cross-linking:</p> $\begin{array}{c}   \\ -C-OH + H-C- \\   \end{array}$ $\longrightarrow \begin{array}{c}   \quad   \\ -C-O-C- \\   \end{array} + H_2$	<p>Irreversible increase in polarization losses due to oxidation.</p> <p>Gumming, formation of X-wax, decrease in volume and gas formation (hydrogen) through cross-linking.</p>	<p>Partial discharge free design.</p> <p>Void-free impregnation.</p> <p>Use of gas-absorbing oils.</p> <p>*) see below</p>
<p>*) General measures:</p>	<p>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.</p>	



- ✓ احیاء روغن معدنی پیرشده تا حدی میسر است. گازهای حل شده و رطوبت می تواند با فرآیند خشک سازی و جداسازی گاز به طور کامل حذف شود.
- ✓ بخشی از ترکیبات قطبی که تلفات را افزایش می دهند می توانند با استفاده از ترکیبات خاص جذب شوند (خاک رنگ بر و آلومینیوم سیلیکات).
- ✓ ایجاد موم X و همچنین تبدیل به رزین قابل برگشت نیستند.



- ✓ 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 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 اشباع‌کننده 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



دانشگاه  
تهران

- ✓ 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 تقریباً 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 ( $\tan\delta=1 \dots 2 \times 10^{-4}$ ).
- ✓ 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 مفره پرسیلانی هم می‌تواند استفاده شود (عملکرد مناسب آن محدودیت 32 زمانی دارد).

محمد حامد صمیمی



## روغن‌های گیاهی و استر طبیعی



دانشگاه  
تهران

- ✓ 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.
- ✓ اخیراً علاقه بسیار زیادی 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.

33

محمد حامد صمیمی





- ✓ 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 تقریباً 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 تقریباً 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 18 C- تبدیل به جامد می‌شود و بنابراین در دمای پایین قابل استفاده نیست.



- ✓ روغن گیاهی خالص مشکلاتی نظیر گران‌روی 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.



- ✓ 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.

- ✓ استر طبیعی کاملاً 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 الکتروود 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 راحت‌تر از روغن معدنی در طبیعت تجزیه می‌شود.

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

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

38  
محمد