به نام خدا

عایق و فشار قوی

فصل سوم
عایق های مایع

مدرس:
بهروز آدینه

مقدّمه

دانش مربوط به تخلیهٔ الکتریکی در عایق‌های مایع نسبت به عایق‌های گازی و حتّی عایق‌های جامد پیشرفت خیلی کم‌تری داشته است. در سال‌های اخیر، مایعات را از برخی جنبه‌ها مورد پژوهش قرار داده‌اند، ولی هنوز یک نظریهٔ جامع قابل قبول برای تخلیهٔ الکتریکی مایعات شناخته نشده است. بنابراین، به دلیل این‌که اطّلاعات به‌دست آمده، متنوّع و در برخی موارد با هم متناقض هستند، چنین یافته‌هایی نمی‌توانند منجر به دستیابی یک نتیجه‌گیری کلّی قابل قبول برای عایق‌های مایع شوند. عایق‌های مایع در کابل‌ها، خازن‌های فشار قوی، ترانسفورماتورها، کلیدهای قدرت و سرکابل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر آن، کار انتقال حرارت را در ترانسفورماتورها و خاموش کردن قوس الکتریکی در کلیدهای قدرت بر عهده دارند. روغن‌های معدنی و یا خام، معمولی‌ترین استفاده را به‌عنوان عایق مایع دارند. هیدروکربن‌های مصنوعی و هیدروکربن‌های هالوژن‌دار هم می‌توانند در بعضی از دستگاه‌ها به‌عنوان عایق مورد استفاده قرار گیرند (مانند روغن‌های سیلیکونی، هیدروکربن‌های فلوئور و ...). بعضی از روغن‌های گیاهی[1] و استرها[2] هم در حدّ کم‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی‌های مهمّ الکتریکی عایق‌های مایع عبارتند از:

الف) هدایت الکتریکی،

ب) قدرت دی الکتریکی (استقامت الکتریکی)،

ج) عدد عایقی

1- Vegetable Oils 2- Esters

هدایت الکتریکی عایق‌ها از $10^{-16}\ \frac{1}{\Omega}-cm$ تا $10^{-13}\ \frac{1}{\Omega}-cm$ تغییر می‌کند و قدرت عایقی در حدود ۳۰kV/cm تا ۵۰kV/cm و عدد عایقی تقریباً ۲/۲ تا ۵ است. دیگر ویژگی‌های مهمّ فیزیکی عبارتند از: چسبندگی و استحکام گرمایی. علاوه بر این خصوصیات، غیر اشتعال بودن و گرمای نهان تبخیر برای افت گرمایی نیز، در نظر گرفته می‌شود.

عایق‌های مایع مانند عایق‌های گازی می‌توانند به راحتی جاری شوند و فضاهای خالی کوچک را به‌راحتی پر کنند. همچنین در صورت بروز شکست الکتریکی در عایق‌های مایع، مجدّداً با کاهش میدان الکتریکی، خاصیت عایقی خود را به‌دست می‌آورند.

اصولاً تاکنون دو دسته نظریه در مورد تخلیهٔ الکتریکی عایق‌های مایع ارائه شد
است. یک دسته نظریه‌هایی است که شکست الکتریکی عایق‌های مایع را بر اساس
همان مدل شکست الکتریکی گازها، یعنی یونیزاسیون اتم‌ها بر مبنای برخورد
الکترون‌ها به آن‌ها در یک میدان الکتریکی (نظریهٔ شکست الکترونی)، بیان می‌کنند.
طبق این نظریه، الکترون از سطح کاتد در اثر اعمال میدان الکتریکی یا در اثر
حرارت، آزاد می‌شود. این نوع نحوهٔ شکست، فقط وقتی قابل قبول است که مایع
کاملاً خالص باشد؛ ولی عملاً چون عایق‌های مایع دارای مقدار زیادی ناخالصی
می‌باشند، از این‌رو، ولتاژ شکست مایعات به دلیل وجود ذرّات ناخالصی در آن،
خیلی کم‌تر از ولتاژ شکست یک عایق مایع خالص می‌باشد. دسته دوم نظریه‌های
تخلیهٔ الکتریکی عایق‌های مایع، شکست الکتریکی مایعات را بر اساس همین ناخالصی‌ها
توجیه می‌کنند. این ذرّات ناخالص شامل حباب‌های گازی، قطرات مایع دیگر (نظیر قطرات
آب) و ذرّات جامد غوطه‌ور در عایق مایع هستند که ولتاژ شکست عایق را پایین
می‌آورند. تنها عایق مایعی که به‌طور وسیع مورد مطالعه و استفاده قرار می‌گیرد،
روغن‌های عایقی هستند که در صورت خالص بودن کامل، استقامت الکتریکی آن‌ها
بیش از ۱MV/cm خواهد بود. عمده‌ترین خواصّ الکتریکی که تعیین کنندهٔ یک مایع
به‌عنوان عایق است، عبارتند از: استقامت الکتریکی بالا، ظرفیت الکتریکی بالا،
ضریب تلفات عایقی کوچک و مقاومت مخصوص بالا.

روغنی که از تصفیهٔ نفت خام به‌دست می‌آید، مخلوطی از هیدروکربن‌های مختلف است و نفوذپذیری الکتریکی نسبی آن‌ها بین ۲ تا ۲/۵ است. همچنین مقاومت مخصوص عایق‌های مایع باید بزرگ‌تر از $10^{9}\Omega.m$ باشد. با این تعریف، آب مقطر هم یک عایق مایع است؛ ولی این مایع را در سیستم‌های فشار قوی نمی‌توان استفاده نمود و در این سیستم‌ها باید از عایق‌های روغن با مقاومت مخصوص بیشتر از $10^{16}\Omega.m$ بهره جست.

عایق‌های مایع خالص و تجاری

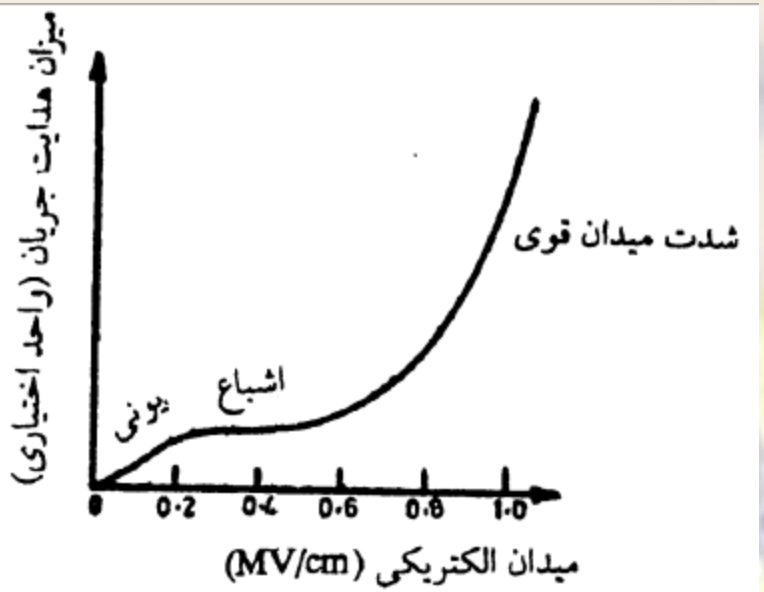
عایق‌های مایع بسته به درجهٔ خلوص آن‌ها، به دو دسته عایق‌های مایع خالص و تجاری تقسیم می‌شوند. روغن‌های خالص دارای درجه خلوص شیمیایی هستند. نسبت ناخالصی آن‌ها کم‌تر از ۱ در 10^9 است و دارای ساختمان ساده‌ای می‌باشند. n–هگزان (C_6H_{14}) و n هپتان (C_7H_{16}) و هیدروکربن‌های پارافین را می‌توان از این دسته نام برد. بررسی جداگانهٔ عوامل مؤثّر بر هدایت و شکست الکتریکی مایعات با استفاده از عایق‌های مایع ساده و خالص آسان‌تر است. از طرف دیگر، عایق‌های مایع تجاری مانند روغن‌ها، از نظر شیمیایی خالص نیستند و از مخلوطی از مولکول‌های ارگانیک پیچیده (که مشخّص کردن یا تولید مجدّد آن‌ها با آزمایش‌های ساده امکان‌پذیر نیست)، تشکیل می‌شوند. حدّاکثر ولتاژ شکست چند مایع خالص در جدول (۳–۱) آمده است. عایق مایع الکتریکی به لحاظ داشتن خواصّ الکتریکی مورد نیاز، از نوع عایق تجاری است و از ترکیب روغن حاصل از نفت با موادّ افزودنی مخصوص به‌دست می‌آید.

جدول (۳–۱) : ولتاژ شکست چند عایق مایع خالص

نوع مایع	قدرت شکست حدّاکثر در چند عایق (MV/cm)
هگزان	۱/۱ – ۱/۳
بنزن	۱/۱
روغن ترانسفورماتور	۱/۰
سیلیکون	۱/۰ – ۱/۲
اکسیژن مایع	۲/۴
نیتروژن مایع	۱/۶ – ۱/۹
هیدروژن مایع	۱/۰
هلیوم مایع	۰/۷
آرگون مایع	۱/۱۰ – ۱/۴۲

نظریهٔ شکست الکترونی

وقتی الکترونی به درون مایع تزریق می‌شود، از میدان الکتریکی اعمالی انرژی می‌گیرد. در نظریهٔ شکست الکترونی، این‌گونه فرض می‌شود که برخی الکترون‌ها، میزان انرژی دریافتی از میدانشان، بیشتر از انرژیی است که در برخورد با مولکول‌ها از دست می‌دهند. اصولاً این نوع مکانیزم شکست برای مایع‌های خالص قابل توجیه است؛ امّا برای عایق‌های مایع تجاری، قابل استفاده نیست. مطالعات هدایت در مایعات با درجهٔ خلوص بالا نشان می‌دهد که در میدان‌های ضعیف، هدایت الکتریکی، بیشتر از نوع یونی و به‌صورت جابه‌جایی ناخالصی‌ها است که با افزایش شدّت میدان، به‌طور خطّی افزایش می‌یابد. با افزایش میدان، این جریان هدایتی به اشباع می‌رسد. در میدان‌های قوی که به شکست الکتریکی می‌انجامد، میزان هدایت سریع‌تر افزایش می‌یابد که تمایل به ناپایداری دارد. اعتقاد بر این است که این افزایش جریان ناشی از کلّ انتشار الکترون در کاتد (توسّط یک یا هر دو مکانیسم فوق یعنی انتشار حرارتی و انتشار بر اثر شدّت میدان قوی) است. شکل (۳-۱) سه مرحلهٔ مختلف هدایت عایق‌های مایع را در میدان الکتریکی نشان می‌دهد.



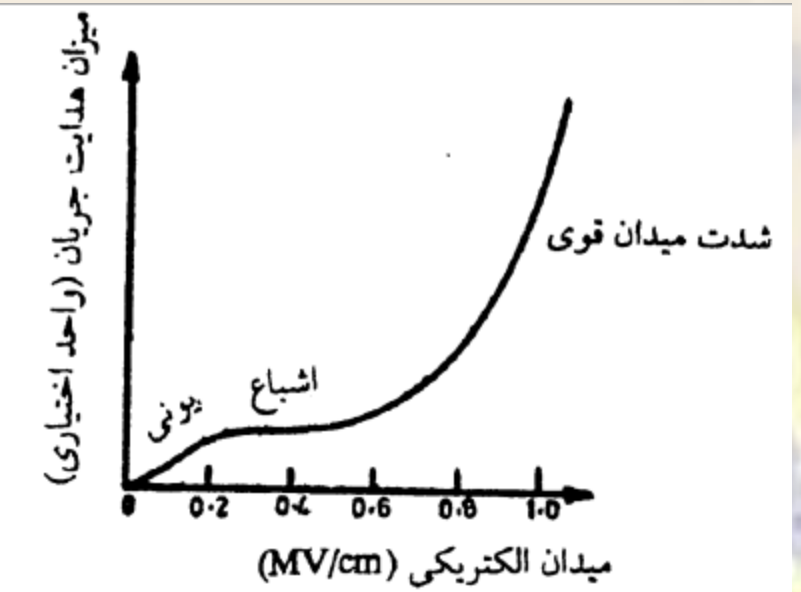
شکل (۳-۱): مراحل مختلف هدایت عایق‌های مایع

در میدان‌های خیلی ضعیف، جریان از جابه‌جایی یون‌ها ایجاد می‌شود. در میدان‌های متوسّط، این جریان به اشباع می‌رسد. در میدان‌های قوی، جریان مذکور بر اثر انتشار الکترون‌ها از کاتد و انجام فرآیندی شبیه به یونیزاسیون اوّلیه و ثانویّه تانزند تا اندازه‌ای افزایش می‌یابد تا به شکست عایق بیانجامد. ولتاژ شکست به شدّت میدان، فاصلهٔ الکترودها، جنس کاتد و درجهٔ حرارت کاتد بستگی دارد. به‌علاوه لزجی، درجه حرارت، چگالی و ساختار مولکولی عایق مایع هم در ولتاژ شکست آن مؤثّر است.

به‌طور کلّی در عایق‌های مایع، شکست الکتریکی ناشی از انتشار الکترون توسّط کاتد را (خواه بر اثر میدان قوی و یا بر اثر حرارت)، "شکست الکترونی" می‌گویند. شرط لازم برای تشکیل بهمن الکترونی این است که انرژیی که یک الکترون در طی میانگین فاصلهٔ آزاد به‌دست می‌آورد، با انرژی لازم برای یونیزاسیون مولکول عایق مایع مساوی و یا بزرگ‌تر از آن باشد. یعنی:

$$eE\lambda \geq W \qquad (۱-۳)$$

در این رابطه، E شدّت میدان الکتریکی اعمال شده، λ میانگین طول فاصلهٔ آزاد، e بار الکتریکی یک الکترون و W انرژی لازم برای یونیزه شدن مولکول است.



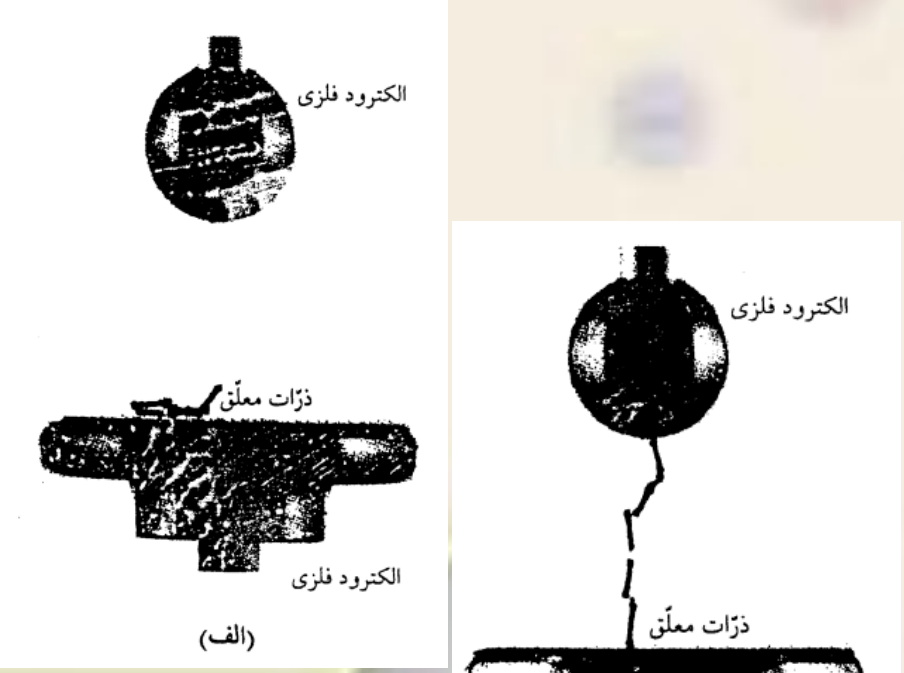
شکل (۳-۱): مراحل مختلف هدایت عایق‌های مایع

مکانیزم شکست در اثر ذرّات ناخالص جامد

ناخالصی‌های جامد موجود در عایق‌های مایع تجاری، ممکن است به‌شکل رشته‌ها یا ذرّات جامد معلّق ریز نظیر براده‌های آهن ظاهر شوند. الیاف‌ها در روغن از صافی‌هایی که از جنس کنف یا الیاف‌های مصنوعی هستند، ایجاد می‌شوند که از این صافی‌ها برای جدا کردن ناخالصی‌ها استفاده می‌شود. این الیاف‌ها و ذرّات جامد می‌توانند استقامت الکتریکی روغن را کاهش دهند؛ مخصوصاً اگر مرطوب هم باشند.

در طی یک آزمایش در یک ظرف روغن، دو الکترود به‌صورت میلهٔ نوک تیز–صفحه، یا کره–صفحه طبق شکل (۳–۲) قرار داده و الکترودها را به منبع ولتاژ متّصل می‌کنیم. اگر داخل ظرف روغن، چند تکّه نخ بیندازیم و ولتاژ منبع را به‌تدریج بالا ببریم، تکه‌های نخ (بر اثر نیروی اعمالی از میدان الکتریکی)، خود را به الکترودها رسانده، در جهت میدان الکتریکی قرار می‌گیرند. در حقیقت، از طرف میدان الکتریکی داخل عایق به این نخ‌های معلّق در روغن نیرویی وارد می‌شود و آن‌ها را به طرف نقاط با شدّت میدان بیشتر (الکترود کروی شکل)، جذب می‌کنند. به این ترتیب، تکّه نخ‌ها دنبال هم قرار گرفته، یک پل زنجیره‌ای را بین دو الکترود تشکیل می‌دهند. این موضوع در شکل (۳–۲) به وضوح مشخّص است.

اگر این نخ‌ها کمی مرطوب باشند، در اتصّال به الکترودها و به یکدیگر، جرقه‌های ریزی مشاهده می‌شود که باعث تخلیهٔ الکتریکی عایق و برقراری جریان در آن می‌شوند.



شکل (۳–۲): اثر ذرّات معلّق در عایق روغن و به‌وجود آمدن پل؛ الف) قبل از وصل ولتاژ؛ ب) بعد از وصل ولتاژ

اکنون فرض کنید که ضریب نفوذپذیری این ذرّات ناخالصی ($\varepsilon_۲$) با ضریب نفوذپذیری عایق مایع ($\varepsilon_۱$)، متفاوت باشد. اگر این ناخالصی‌ها را ذرّات کروی با شعاع r فرض کنیم، آنگاه در شدّت میدان الکتریکی E نیروی F_e به ذرّات وارد می‌شود که عبارت است از:

$$F_e = \frac{۱}{۲} r^۳ \frac{\varepsilon_۲ - \varepsilon_۱}{\varepsilon_۲ + ۲\varepsilon_۱} \text{ grad } E^۲ \qquad (۲-۳)$$

اگر $\varepsilon_۲ > \varepsilon_۱$ باشد (مثلاً اگر ذرّات جامد الیاف‌های کاغذ در روغن باشند) این نیرو در جهت ناحیه با حدّاکثر شدّت میدان است و اگر ذرّات ناخالصی از جنس حباب‌های گاز باشند ($\varepsilon_۲ < \varepsilon_۱$)، در آن‌صورت، نیرو در جهت ناحیه‌ای است که کم‌ترین شدّت میدان را دارد. با افزایش ضریب نفوذ ذرّات معلّق ($\varepsilon_۲$)، نیرو افزایش می‌یابد و برای ذرّات هادی با $\varepsilon_۲ \to \infty$ نیرو عبارت است از:

$$F_e = F_\infty = \frac{۱}{۲} r^۳ \text{ grad } E^۲ \qquad (۳-۳)$$

وجود ذرّات فلزی بین الکترودها، میدان موضعی اطراف ذرّه را تا حدود ۳ برابر افزایش می‌دهند که ممکن است برای شروع تخلیهٔ الکتریکی کافی باشد. در ولتاژ DC و یا در ولتاژهای AC با فرکانس‌های کم، این نیرو باعث می‌شود تا ذرّات به سمت ناحیهٔ حدّاکثر شدّت میدان رانده شوند. در میدان‌های همگن هم، این نواحی بر اثر نامنظّمی‌های سطح الکترودها وجود دارند. از آنجا که این ذرّات پلاریزه می‌شوند و در راستای میدان قرار می‌گیرند، بنابراین، در صورتی‌که تعداد این ذرّات زیاد باشد، به دنبال یکدیگر قرار می‌گیرند و زنجیره‌ای بین دو الکترود ایجاد می‌کنند.

جریانی که در طول چنین زنجیره‌ای ایجاد می‌شود، حرارت موضعی را افزایش می‌دهد و از آنجاکه ضریب نفوذپذیری الکتریکی آب در مقایسه با روغن بسیار زیاد است، نیروی F بر ذرّات آب و یا ذرّات مرطوب، زیاد خواهد بود. بنابراین، وجود چنین ذرّاتی ولتاژ شکست را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. برای جلوگیری از این حادثه، می‌توان از موادّ جاذب رطوبت هوا مانند سلیکاژل[1] در مسیر ارتباط روغن با هوا استفاده کرد. سلیکاژل در ابتدا آبی رنگ و پس از جذب رطوبت صورتی و یا بنفش رنگ می‌شود که باید آن را تعویض کرد و هر چند وقت یک بار با تصفیهٔ روغن، ذرّات معلّق آن را جدا ساخت.

اغلب موارد، همراه با عایق مایع، عایق جامدی، نظیر کاغذ نیز به‌کار برد
می‌شود. از این کاغذهای جامد، به‌تدریج و به مرور زمان، ذرّات معلّق جدا شده، د
عایق مایع غوطه‌ور می‌شوند. رطوبت هم معمولاً به‌دلایل مختلف از خارج وار
محفظهٔ عایق مایع می‌شود و یا از قبل در عایق وجود داشته است. همچنین ممکن
است رطوبت به مرور زمان در اثر اکسیداسیون به‌وجود آید (در اثر تجزیهٔ روغن در
اثر گرما و جرقه، هیدروژن به‌وجود می‌آید و با اکسیژنِ حل شده در مایع، ترکیب
شده و H_2O تولید می‌شود). بنابراین، عملاً نمی‌توان به‌طور کامل از وجود ذرّات
معلّق در عایق‌های مایع جلوگیری کرد؛ ولی باید تا حدّ امکان از حضور ذرّات معلّق و
مرطوب در آن‌ها جلوگیری نمود. مثلاً باید قبل از پر کردن دستگاه با روغن،
عایق‌های کاغذی را با درجه حرارت‌های بالا (در حدود ۱۰۰ درجه) و با خلاء، کاملاً
خشک نمود تا رطوبت کاملاً از آن بیرون آید. سپس با وجود خلاء، دستگاه را با
روغن پر کرد و برای جلوگیری از جذب رطوبت هوا به‌وسیلهٔ روغن دستگاه، از موادّ
جاذب رطوبت هوا نظیر سلیکاژل در مسیر ارتباط روغن با هوا استفاده نمود.

1- Silicagel

مکانیزم شکست در اثر حباب‌های ناخالص گازی

در عایق‌های مایع همانند عایق‌های گازی، ممکن است اطراف الکترودهای نوک تیز، تخلیهٔ ناقص ایجاد شود که این موضوع باعث گرم شدن روغن، تجزیهٔ روغن و در نتیجه به‌وجود آمدن حباب‌های گازی در روغن می‌شود. این حباب‌های گازی (البتّه تعدادی از آن‌ها)، ممکن است در روغن حل شوند و تعدادی از آن‌ها ممکن است در داخل روغن غوطه‌ور گردند. همچنین حفره‌های گازی ممکن است روی شیارهای ناصاف بر سطح کاتد به‌وجود آیند و یا در اثر تغییر درجه حرارت و فشار گاز و یا به‌هم‌زدن روغن، حباب‌های گازی در آن به‌وجود آیند. همچنین به‌علّت آن‌که روی ناهمواری‌های سطح الکترودها، دانسیته جریان زیادتر می‌باشد، از این‌رو، مایع اطراف آن بخار شده و حباب‌های گازی تشکیل می‌شود.

شدّت میدان الکتریکی در داخل حباب‌های گازی کروی شکل، با عدد مطلق دی الکتریک ۱ برابر است با:

$$E = \frac{۳\varepsilon_۱}{۲\varepsilon_۱ + ۱} E_۰ \qquad (۴-۳)$$

که در این رابطه،

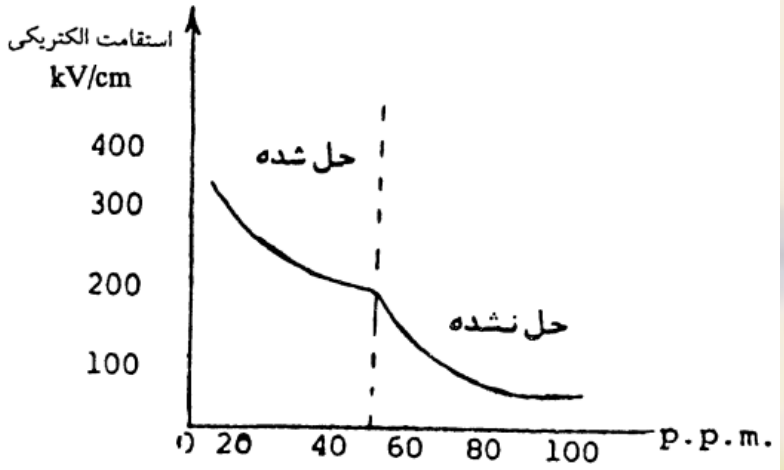
$\varepsilon_۱$ = عدد مطلق دی الکتریک روغن،

$E_۰$ = شدّت میدان الکتریکی داخل عایق مایع قبل از تشکیل حباب‌ها است.

هنگامی‌که این شدّت میدان الکتریکی، از شدّت میدان الکتریکی شکست حباب‌های گاز بیشتر باشد، شکست گاز داخل حفره‌ها رخ می‌دهد (معمولاً این شدّت میدان از شدّت میدان الکتریکی داخل عایق مایع بیشتر است و از طرفی استقامت الکتریکی حفره‌های گازی، خیلی کم‌تر از استقامت الکتریکی روغن است). گرمای ایجاد شده در اثر بروز جرقه و شکست الکتریکی در این حفره‌های گازی، باعث تبخیر مایع اطراف آن‌ها و در نتیجه، تشکیل حباب‌های گازی بیشتر شده و در نهایت، موجب تشکیل پل بین الکترودها و تخلیهٔ الکتریکی کامل عایق مایع می‌شود. پس از تشکیل حباب، بر اثر نیروهای الکترواستاتیکی، حباب‌ها در امتداد میدان کشیده می‌شوند و در عین حال حجم حباب ثابت می‌ماند. کشیدگی حباب در طول میدان، باعث قرار گرفتن ولتاژ بیشتری در دو سر آن می‌شود. وقتی شدّت میدان حباب به E و یا ولتاژ دو سر حباب به ولتاژ شکست گاز برسد، شکست الکتریکی در آن رخ می‌دهد.

مکانیزم شکست در اثر ناخالصی قطرات مایع‌های دیگر

جذب رطوبت توسّط عایق مایع، استقامت الکتریکی آن را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد؛ به‌طوری که استقامت الکتریکی روغن‌ها به میزان زیادی به رطوبت آن‌ها بستگی دارد. اگر رطوبت به‌صورت محلول در روغن باشد، استقامت الکتریکی روغن کم‌تر از موقعی که به‌صورت قطرات آب شناور در روغن باشد، کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان در شکل (۳-۴) مشاهده نمود. میزان ۰/۰۱٪ آب در روغن، ۲۰٪ قدرت عایقی روغن را کاهش می‌دهد. اصولاً روغن در درجه حرارت ۲۰°C مقدار آبی که می‌تواند در آن حل شود، حدود ۸۰PPM[1] است، مقادیر بیشتر آب به‌صورت ذرّات ریز در روغن شناور و یا به‌صورت قطرات درشت، ته‌نشین می‌شوند. رطوبت موجود در ترانسفورماتور، از طریق نفس کشیدن ترانسفورماتور وارد آن می‌شود و یا از طریق اکسیداسیون روغن به‌وجود می‌آید. با استفاده از مادهٔ سلیکاژل، رطوبت هوای تنفس روغن قابل جذب است (تعویض به موقع سلیکاژل از اهمیت بالایی برخوردار است). همچنین رطوبت



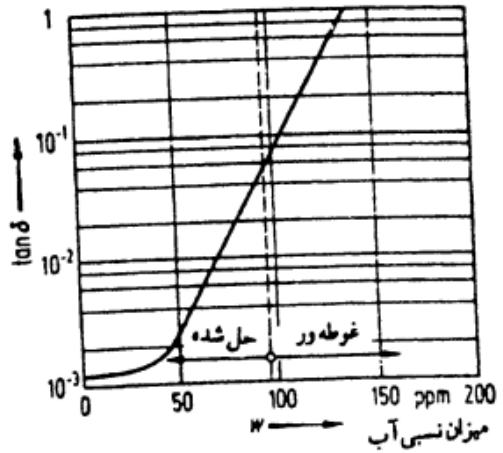
شکل (۳-۴): تغییرات ولتاژ شکست روغن با درصد آب حل شده در آن

1- Part Per Million

روغن را هم می‌توان به کمک حرارت و پمپ خلاء از آن خارج کرد. رطوبت، باعث افزایش ضریب تلفات عایقی و در نتیجه، افزایش تلفات عایقی می‌شود (شکل ۳-۵ را مشاهده کنید). مقدار این تلفات عایقی (P) برابر است با:

$$P = V^2 c\, \omega \tan\delta \qquad (۶-۳)$$

در این رابطه، $\tan\delta$ ضریب تلفات عایقی، $\omega = 2\pi f$، V ولتاژ اعمالی به عایق و C ظرفیت خازنی عایق مایع است. وجود قطرات مایع‌های دیگری نظیر قطرات آب در روغن، باعث می‌شود که در یک شدّت میدان الکتریکی بحرانی، این قطرات به‌صورت ناپایدار در آمده و در راستای میدان، به‌صورت کشیده در می‌آیند و باعث ایجاد یک مسیر با مقاومت کم بین الکترودها و در نهایت، موجب شکست کامل عایق مایع می‌شود.



شکل (۳-۵): تغییرات ضریب تلفات عایقی با درصد رطوبت موجود در آن