مروری برروغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی

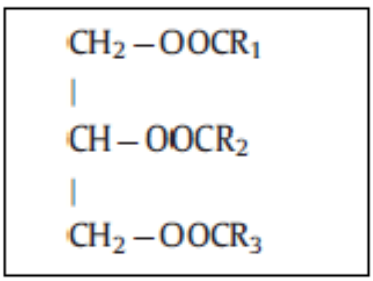
زینب نوروزی تیسه*، علی سبزی
گروه شیمی و فرایند- پژوهشگاه نیرو
znoroozi@nri.ac.ir

۱. مقدمه

روغن‌های ترانسفورماتور پایه معدنی، قرن‌هاست که به‌عنوان عایق و سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود. اگرچه روغن‌های ترانسفورماتور پایه معدنی به علت محدودیت منابع معدنی و محدودیت در ذخیره‌سازی و سایر معایب نظیر غیرقابل تجزیه شدن توسط محیط زیست (کمتر از ۳۰٪) و نقطه اشتعال پایین، نگرانی‌هایی برای محققان و صنعتگران ایجاد کرده است [۱-۳]. روغن‌های گیاهی که به‌طور طبیعی از گیاهان بدست می‌آیند جایگزین مناسبی برای روغن‌های معدنی می‌باشند. روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی دارای خواص منحصربفردی نظیر سمیت پایین، نقطه اشتعال بالا(بیشتر از ۳۰۰°C) قابلیت آتشگیری پایین، قابلیت زیست تجزیه پذیری بالا (بیشتر از۹۵٪) و سازگاری با محیط زیست می باشند [۴ و۵]. از اواسط دهه ۱۹۹۰ تلاش‌ها و تحقیقات در زمینه ساخت سیالات با قابلیت زیست تجزیه پذیر آغاز شد و روغن‌های گیاهی به عنوان سیالات عایقی کاملا زیست تجزیه پذیر مورد توجه قرار گرفتند. اولین محصول تجاری روغن-های ترانسفورماتور پایه گیاهی در سال ۱۹۹۹ گزارش شده است که پایه این روغن گیاهی حاوی ۸۰٪ اسید اولئیک بوده است[۶ و۷]. سپس از تحقیقات در این زمینه ادامه یافت و موارد متعددی مبنی بر ساخت روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی گزارش شد [۸-۱۰]. دراین مقاله نیز، موقعیت کنونی روغن‌های ترانسفورماتور گیاهی شامل فرایندهای تولید، فرآوری و شناسایی این روغن ها مرور می شود؛ همچنین مزایا، محدودیت‌ها و چالش های مربوط به روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی نیز بررسی می شود.

۲. ساختار شیمیایی روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی

روغن های گیاهی به‌عنوان منابعی طبیعی به مقدار فراوان در دسترس می-باشند [۱۱]. به‌طور کلی روغن‌های گیاهی از تری‌گلیسیریدها تشکیل می شوند و این روغن‌ها عموما در دمای اتاق به شکل مایع هستند. مقادیر زیاد اسیدهای چرب غیراشباع موجود در ساختار روغن گیاهی پایه، سبب ناپایداری روغن‌های ترانسفورماتور شده و آن‌ها را مستعد اکسیداسیون می-سازد. طول زنجیره هیدروکربنی و درجه غیراشباعی این روغن‌ها بر روی خواص فیزیکی و شیمیایی و دی‌الکتریک آن‌ها بسیار موثر است [۱۲و۱۳]. به علت واکنش هیدرولیز که در روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی رخ می‌دهد این دسته از روغن‌ها دارای اسیدیته بیشتری نسبت به روغن‌های ترانسفورماتور پایه معدنی هستند. همچنین طبیعت اسیدهای موجود در دو روغن ترانسفورماتور گیاهی و معدنی نیز باهم متفاوت است. روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی عمدتا شامل اسیدها با وزن مولکولی بالا[1]می‌باشند در حالیکه روغن‌های ترانسفورماتور پایه معدنی شامل اسیدها با وزن مولکولی پایین[2] هستند [۱۴-۱۶]. ساختار مولکولی استرهای گلیسیرید در شکل ۱ نشان داده شده است به‌گونه ای که R1، R2، R3 زنجیره‌های اسیدچرب یکسان یا متفاوت هستند. اسیدهای چرب اشباع شده با ۸-۲۲ اتم کربن متداول هستند. جدول ۱ ترکیب شیمیایی تعدادی از روغن‌های گیاهی مناسب جهت ساخت روغن ترانسفورماتور گیاهی را نشان می‌دهد[۱۷].



شکل ۱- ساختار مولکولی استرهای گلیسیرید

[1] High molecular weight acid (HMA)
[2] Light molecular weight acid (LMA)

جدول ۱- ترکیب شیمیایی تعدادی از روغن‌های گیاهی مناسب جهت ساخت روغن ترانسفورماتور گیاهی

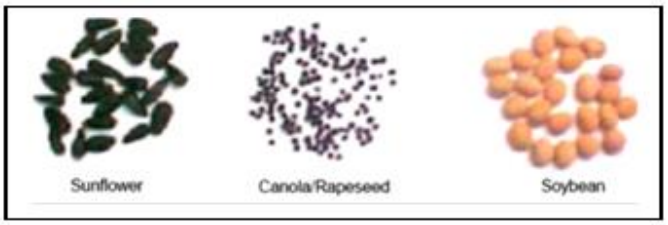
Vegetable oil	Saturated fatty acids (%)	Unsaturated Fatty Acids (%)		
		Mono-	Di-	Tri-
Canola oil[a]	7.9	55.9	22.1	11.1
Corn oil	12.7	24.2	58	0.7
Cottonseed oil	25.8	17.8	51.8	0.2
Peanut oil	13.6	17.8	51.8	0.2
Oilve oil	13.2	73.3	7.9	0.6
Safflower oil	8.5	12.1	74.1	0.4
Safflower oil, high oleic	6.1	75.3	14.2	–
Soyabean oil	14.2	22.5	51	6.8
Sunflower oil	10.5	19.6	65.7	–
Sunflower oil, high oleic	9.2	80.8	8.4	0.2

۳. تولید و توسعه روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی

از آنجاییکه ساختار شیمیایی روغن‌های ترانسفورماتور گیاهی به‌گونه ای است که در مدت زمان کوتاهی تجزیه می‌شوند بنابراین برای مصارف بلند مدت نیاز به بهبود دارند. به‌طورکلی فرایند توسعه و بهبود این روغن‌ها چند مرحله ای است، مرحله نخست این فرایند، انتخاب روغن گیاهی مناسب است، مرحله بعد خالص سازی و غنی سازی آن به منظور مصرف در تجهیزات الکتریکی و مرحله پایانی، پایدارسازی آن برای عملکرد در ترانسفورماتور در شرایط سخت است. که این مراحل در ادامه شرح داده می‌شود.

۱،۳. انتخاب روغن گیاهی، فرایند فراوری و بهبود روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی

دانه‌های روغن‌های گیاهی دارای دو بخش هستند: بخش مایع که روغنی است و بخش جامد که دارای ساختار پروتئینی (بخش مغذی) است. بخش روغنی از ماده خام بوسیله فرایندهای تصفیه(پالایش)، رنگزدایی و بوزدایی[۳] جدا می‌شود. برای استخراج بخش روغنی از حلال‌های هیدروکربنی استفاده می‌شود و سپس حلال‌ها به‌وسیله فرایندهای شیمیایی حذف می‌شوند. فرایندهای پالایش و رنگزدایی نیز شامل تصفیه به‌وسیله جاذب‌های دیاتومه و فیلتراسیون است. در فرایند بوزدایی از بخارات فوق گرم جهت حذف بو استفاده می‌شود. در برخی موارد علاوه بر فرایندهای مذکور، از فرایند سرمایی زایی[۴] برای حذف چربی‌های اشباع شده استفاده می‌شود. روغن جداسازی شده توسط این فرایند ماده اولیه تجاری برای روغن‌های ترانسفورماتور است. شکل ۲ انواع دانه‌های گیاهی متداول جهت ساخت در روغن‌های ترانسفورماتور را نشان می‌دهد [۱۷].



شکل ۲- انواع دانه‌های گیاهی متداول جهت ساخت روغن¬های ترانسفورماتور

روغن خام بدست آمده از دانه‌های روغنی دارای رنگی تیره و مواد جامدی نظیر فیبرها و پروتئین‌ها است. ساختار شیمیایی روغن و چربی، استرهای تری‌گلیسیرید و اسیدهای چرب است با این تفاوت که چربی‌ها دارای درصد بیشتری از تری‌گلیسیریدهای سیرشده هستند و در دمای کمتر از دمای اتاق منجمد می‌شوند. بخش روغنی معمولا در دمای بالاتر از ۰°C به شکل مایع می‌باشد. روغن‌ها با درجه سیرنشدگی (غیراشباعی) زیاد در محدوده دمایی ۱۵ °C- تا ۳۰°C- به‌صورت مایع هستند. در ادامه، طی فرایند غنی سازی و افزودن مواد افزودنی گونانون به روغن خام فرایند تولید روغن‌های ترانسفورماتور کاربردی کامل می‌شود.

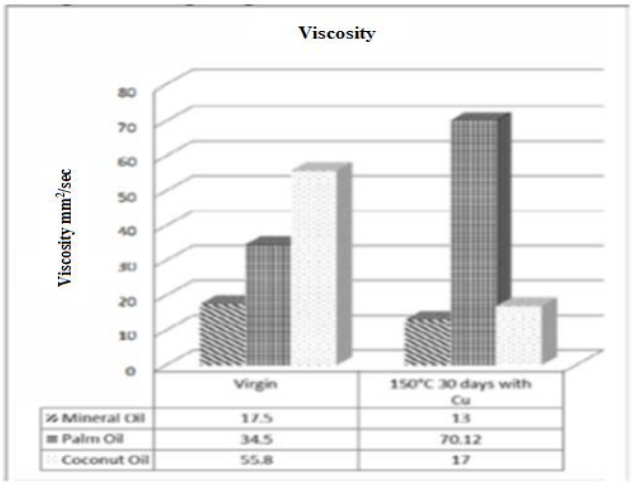
۴. خواص فیزیکی و شیمیایی روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی ویسکوزیته

ویسکوزیته اندازه گیری مقاومت روغن در برابر سیالیت است و به دو صورت مطلق با واحد (cP) و یا نسبتی با واحد (cSt) قابل اندازه گیری می باشد ویسکوزیته یک سیال عایق از عوامل موثر در انتقال حرارت می باشد. به طور کلی با کاهش ویسکوزیته خاصیت خنک کنندگی در روغن افزایش و خاصیت روانکاری کاهش می یابد و بالعکس. انتقال سرما سبب برداشتن حرارت می‌شود و ویسکوزیته بالاتر منجر به ایجاد دمای نقطه داغ بالاتر در

[3]Refined, Bleached and Deodorized Process (RDB)

[4]Winterization

ترانسورماتور می شود. شکل۳ ویسکوزیته انواع روغن های ترانسفورماتور را نشان می دهد[۲].



شکل ۳- ویسکوزیته انواع روغن‌های ترانسفورماتورپایه گیاهی و معدنی

۱,۴. نقطه ریزش

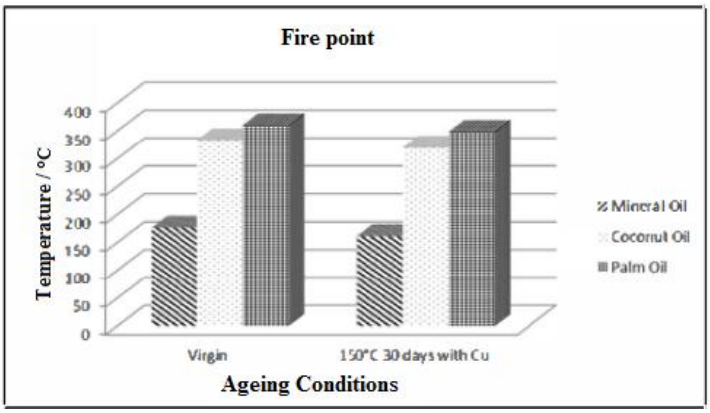
نقطه ریزش یک مایع پایین ترین دمایی است که در آن مایع تحت شرایط تعیین شده روان و جاری می گردد .نقطه ریزش پارامتری کلیدی برای نشان دادن عملکرد روغن ترانسفورماتور در دماهای پایین است .خواص دمای پایین روغن‌های ترانس در مناطق سردسیر از اهمیت ویژه ای برخوردار است. روغن‌های گیاهی دارای نقطه ریزش بالاتری نسبت به روغن‌های معدنی هستند و محدوده نقطه ریزش روغن‌های گیاهی از C ° ۱۵- تا C ° ۲۵- است [۱۸].

۲,۴. نقطه اشتعال

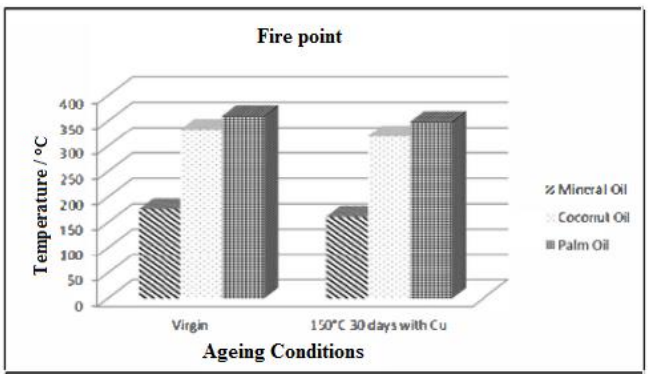
نقطه اشتعال روغن،کمترین درجه حرارتی است که در آن مخلوط بخارات روغن و هوا، شعله ناپایدار تشکیل دهد، نقطه اشتعال روغن به لحاظ موارد ایمنی اهمیت زیادی دارد. قابلیت آتشگیری مهمترین پارامتر ایمنی روغن-های ترانسفورماتور در سالهای اخیر می‌باشد. به‌علت موارد بسیار آتشگیری روغن‌های ترانسفورماتور که قابل مهار نبوده است و سبب خسارات و صدمات جبران ناپذیری شده است لذا ساخت روغن‌های ترانسفورماتور دارای نقطه اشتعال بالا بسیار حائز اهمیت است .همانگونه که جدول ۲ نشان می دهد روغن های ترانسفورماتور پایه گیاهی درمقایسه با سایر روغن های ترانسفورماتور دارای نقطه اشتعال بالاتری(بیشترازC ° ۳۰۰) هستند[۱۹].

جدول ۲- مقایسه نقطه اشتعال و نقطه آتشگیری انواع روغن‌ها جهت ساخت روغن‌های ترانسفورماتور

Fluid type	Flash point	Fire point (ºC)	Class
Mineral oil	160–170	170–180	O
Silicone fluid	> 300	> 350	K3
Low viscosity silicone fluid	268	312	K3
Natural ester	> 300	> 350	K2
Synthetic ester	> 250	> 300	K3



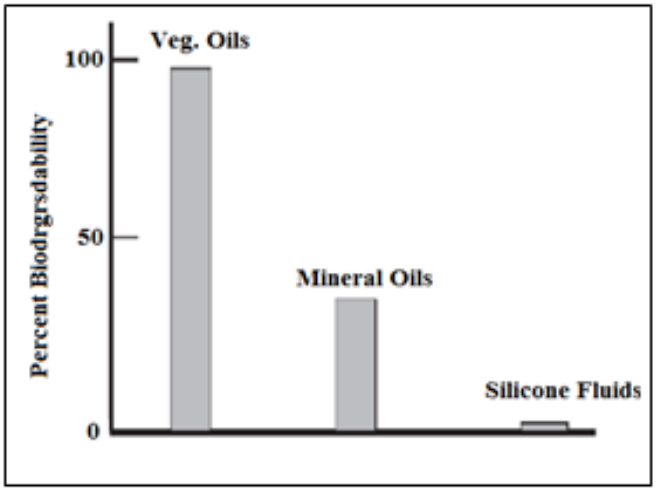
شکل ۴- مقایسه نقطه اشتعال انواع روغن‌های ترانسفورماتورپایه گیاهی و معدنی[۲۰]



شکل ۵- مقایسه نقطه آتشگیری انواع روغن‌های ترانسفورماتورپایه گیاهی و معدنی[۲۰]

۳,۴. پایداری و قابلیت تجزیه پذیری

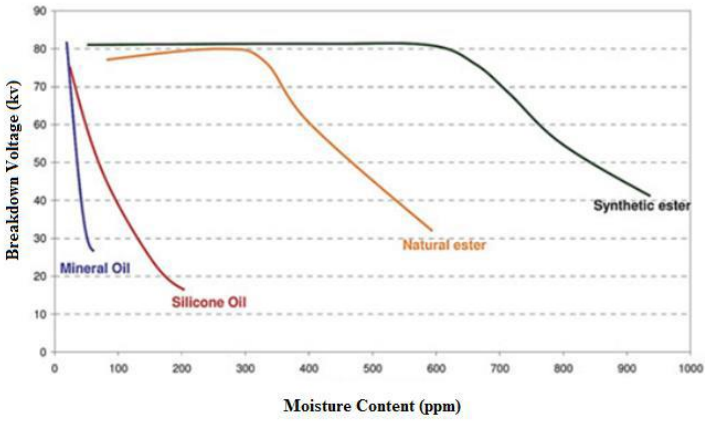
روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی تجزیه پذیر هستند و این خصوصیت دارای مزایا و معایبی می‌باشد. از آنجاییکه این دسته از روغن‌ها در مقایسه با روغن‌های ترانسفورماتور پایه معدنی دارای قابلیت تجزیه پذیری بالایی هستند و بسیار مستعد اکسیداسیون می‌باشند بنابراین دارای پایداری کمتری هستند و در زمان قرارگیری آنها در معرض اکسیژن و رطوبت نیاز به مراقبت و کنترل بیشتری است [۲۱].



های گیاهی، شکل ۶- مقایسه میزان زیست تجزیه پذیری انواع روغن معدنی و سیلیکونی

۴,۴. خواص الکتریکی

شکست یا ضعف الکتریکی روغن ترانس که به صورت ولتاژ شکست قابل اندازه گیری می باشد، معرف توانایی روغن برای تحمل تنش‌های الکتریکی است. ین خاصیت بسیار جامع بوده و اندازه آن به مقدار ذرات، مقدار آب و روش آزمون بستگی دارد. معمول‌ترین روش استاندارد برای اندازه گیری شکست الکتریکی، IEC 156 است .در این روش، ولتاژ بین دو الکترود کروی با نرخ kv/s ۲تا جایی افزایش می یابد که شکست الکتریکی اتفاق افتد ولتاژ این لحظه به عنوان ولتاژ شکست ثبت می شود . پایینترین سطح مورد قبول برای ولتاژ شکست در استاندارد IEC296 ، kv ۳۰می رسد. شکل ۷ میزان ولتاژ شکست انواع روغن‌های ترانسفورماتور را بر اساس میزان رطوبت نشان می دهد[۲۲]. از آنجاییکه شکست ولتاژ به‌طور چشمگیری به میزان ناخالصی‌های موجود در روغن ترانسفورماتور نظیر ذرات ناخالصی، رطوبت اضافی و حباب‌های هوا و گاز موجود در آن بستگی دارد، بنابراین ولتاژ شکست نشان دهنده میزان کیفیت روغن ترانسفورماتور است.



شکل ۷- مقایسه میزان ولتاژ شکست انواع روغن های ترانسفورماتور

۵,۴. میزان آب

به‌طور کلی رطوبت در سیالات عایق به دو شکل وجود دارد:

-آب آزاد

-آب محلول

پایین نگه داشتن مقدار آب در یک منطقه مرطوب و گرم مشکل است همچنین واضح است که در صوت وجود آب آزاد، فقط گرم کردن روغن به تنهایی نخواهد توانست میزان کل آب را در روغن کاهش دهد چرا که حلالیت آب در روغن با افزایش دما افزایش می یابد. بنابراین درصورت وجود آب آزاد ، اگرچه گرم کردن روغن باعث تسریع در جداسازی آب می‌گردد ولی میزان آب محلول افزایش می یابد. به همین منظور در سیستم های تخلیص از فرایند گرمایش تحت خلاء برای رطوبت زدایی استفاده می شود.

روغن‌های معدنی غیر قطبی وروغن‌های سیلیکونی دارای قطبیت کمی هستند ولی روغن‌های گیاهی قطبی بوده، بنابراین جذب رطوبت روغن‌های ترانسفورماتور گیاهی بیشتر از روغنهای معدنی و سیلیکونی است. روغن-های ترانسفورماتور پایه معدنی و سیلیکونی به جذب رطوبت بسیار حساس هستند و نفوذ مقادیر بسیار کم رطوبت در روغن‌های ترانسفورماتور معدنی سبب زوال چشمگیری در ولتاژ شکست آنها می شود.

۶,۴. گازهای تولید شده در اثر کارکرد روغن ترانسفورماتور پایه گیاهی و معدنی

زمانیکه روغن در معرض جهش‌های الکتریکی قرار می گیرد، بعضی از مولکول‌های روغن که به سطح انرژی بالاتر می رسند، شکسته شده و اجزای سبک از آنها جدا می شود. اجزای جداشده غالبا به صورت H_2 و CH_4 در روغن حضور می یابند.

چنانچه حجم گاز محبوس شده در روغن زیاد باشد، حباب‌های تشکیل شده به علت داشتن خواص عایق سازی ضعیف در مقایسه با روغن می توانند باعث شکست الکتریکی گردند. تحقیقات نشان می دهد روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی در مقایسه با روغن های ترانسفورماتور پایه معدنی عملکرد عایقی بهتری نشان می دهد[۱۰].

۵. مزایا، مشکلات فنی و چالشهای تحقیقاتی

به‌طور کلی مزایا، مشکلات فنی و چالش‌های روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی عبارت است از:

۱,۵. مزایا

-قابلیت زیست تخریب پذیری و سازگاری با محیط زیست

-قابلیت اشتعال و آتشگیری کم

-ایمنی زیاد و سمیت کم

- تقویت اقتصاد کشاورزی

- قابلیت تجدیدپذیری

۲,۵. مشکلات فنی و چالشهای تحقیقاتی:

-مطالعات و تحقیقات وسیعتری در زمینه کاهش قیمت انبارش دانه‌های روغنی نیاز است همچنین شناسایی و تولید دانه‌های روغنی جدید برای کاهش قیمت محصول نیز موثر است.

-دشوار فرایندهای ذخیره سازی و نگهداری روغن‌های گیاهی از دیگر چالش‌ها می‌باشد.

-تولید روغن‌های ترانسفورماتور گیاهی به عنوان محصول تجاری به کیفیت مواد اولیه گیاهی، تامین کننده مواد اولیه و روشهای تولید آن وابسته است. حصول اطمینان از دردسترس بودن روغن خام گیاهی جهت تولید روغن های ترانسفورماتور پایه گیاهی در مقیاس صنعتی از دیگر چالش‌ها می‌باشد.

نقطه ریزش روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی نمی‌تواند کمتر از $-۳۰^{\circ}C$ شود بنابراین استفاده از این روغن‌ها در شرایط آب و هوایی سرد از دیگر چالش‌ها است[۲۳،۲۰،۱۷،۱۰-۴۱].

در جدول ۳ خواص فیزیکی و شیمیایی انواع روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی، معدنی و سیلیکونی مقایسه شده است.

جدول ۳- مقایسه خواص فیزیکی و شیمیایی انواع روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی، معدنی و سیلیکونی [۳۱]

	Vegetable oil	High temp. mineral oil	Silicone 561 fluid
Physical			
Appearance	Light yellow	Light yellow	Colorless
Specific Gravity at 25 °C	0.91–0.92	0.89	0.96
Kinematic viscosity. (cSt)			
0 °C	170–250	2200	95
25 °C	55–75	300	50
40 °C	33–45	125	38
100 °C	8–10	13	16
Pour point, ºC	−15 to −25	−20 max.	−50 max.
Interfacial tension (IFT), dynes/cm	25	40–45	25
Flash point ºC	310–325	275 min.	300 min.
Fire point ºC	354–360	160–180	340
Moisture content, ppm dry oil	50–100	10–25	50
(water solubility at 25 °C)	1200	60	200
Thermal constants			
Heat capacity, cal/g ºC	0.50–0.57	0.488	0.363
Thermal conductivity, W/mK	0.17	0.13	0.15
Coefficient of expansion/ºC	0.0007	0.00073	0.00104
Chemical			
Chemical type	Ester	Hydrocarbon	Organo-silicon
	0.06	0.01	0.01
	Pass	Pass	Pass
Electrical			
Dielectric constant at 25 °C	3.1	2.2	2.71
Volume resistivity at 25 °C, Ohm cm	10^{14}	10^{14}–10^{15}	10^{14}
Breakdown voltage, kV			
ASTM D 1816,2 mm gap electrodes	74	60	–
Impulse breakdown voltage, kV(needle negative)	116	145	136
Dissipation factor (%)			
25 °C	0.25	0.05 max.	−0.01
100 °C	1.00	0.3 max.	–
Grassing tendency-ASTM D2300	−50	−10 to 20	N/A
Biodegradability			
CEC-L-33 (21 days)	97–99	30	Very low

۶. نتیجه گیری

تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه تولید روغن‌های ترانسفورماتورگیاهی صورت گرفته است و مطالعات در زمینه مزایا، مشکلات فنی و چالش های این دسته از سیالات همچنان ادامه دارد. استفاده از روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی می تواند نقش کلیدی در کاهش اثرات زیست محیطی روغن‌های ترانسفورماتور معدنی ایفا کند.علاوه بر مسایل زیست محیطی، کاهش منابع نفتی و کمبود جدی این منابع در آینده از دلایل دیگر لزوم طراحی و ساخت روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی در سراسر جهان است؛ بنابراین توجه به توسعه و تولید این دسته از روغن‌های ترانسفورماتور می‌تواند کمک شایانی به حفظ منابع نفتی و محیط زیستی نماید.

قدردانی

از حمایت‌های معاونت پژوهشی پژوهشگاه نیرو در جهت پیشبرد این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌شود.

منابع

[1] H. B. Sitorus, A. Beroual, R. Setiabudy, and S. Bismo, "Comparison of streamers characteristics in jatropha curcas methyl ester oil and mineral oil under lightning impulse voltage," in Dielectric Liquids (ICDL), 2014 IEEE 18th International Conference on, 2014, pp. 1-4.

[2] S. Senthil Kumar, M. Willjuice Iruthayarajan, and M. Bakrutheen, "Analysis of Vegetable Liquid Insulating Medium for Applications In High Voltage Transformers," in IEEE International Conference on Science Engineering and Management Research, Chennai, 2014, pp. 27-29.

[3] S. Sinan, S. Shawaludin, J. Jasni, N. Azis, M. Ab Kadir, and M. Mohtar, "Investigation on the AC breakdown voltage of RBDPO Olein," in Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2014 IEEE, 2014, pp. 760-763.

[4] S. Chandrasekar and G. Montanari, "Analysis of partial discharge characteristics of natural esters as dielectric fluid for electric power apparatus applications," IEEE Trans Dielectr Electr Insul, vol. 21, pp. 1251-1259, 2014.

[5] S. Tenbohlen and M. Koch, "Aging performance and moisture solubility of vegetable oils for power transformers," IEEE Trans Power Del, vol. 25, pp. 825-830, 2010.

[6] T. V. Oommen and C. C. Claiborne, "Electrical transformers containing electrical insulation fluids comprising high oleic acid oil compositions," ed: Google Patents, 1999.

[7] G. S. Cannon and L. A. Honary, "Soybean based transformer oil and transmission line fluid," ed: Google Patents, 1999.

[8] C. P. McShane, J. L. Corkran, R. A. Harthun, G. A. Gauger, K. J. Rapp, and E. Howells, "Vegetable oil based dielectric coolant," ed: Google Patents, 2000.

[9] S. Vishal and P. Vikas, "Transformer's history and its insulating oil," in 5th National Conf., INDIACom, Computing For Nation Development, 2011.

[10] Y. Bertrand and L. Hoang, "Vegetal oils as substitute for mineral oils," in Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7th International Conference on, 2003, pp. 491-494.

[11] T. Oommen, C. Claiborne, E. Walsh, and J. Baker, "Biodegradable transformer fluid from high oleic vegetable oils," in Doble Conf. Paper, 1999.

[12] A. Abdelmalik, J. C. Fothergill, S. J. Dodd, A. P. Abbott, and R. Harris, "Effect of side chains on the dielectric properties of alkyl esters derived from palm kernel oil," in Dielectric Liquids (ICDL), 2011 IEEE International Conference on, 2011, pp. 1-4.

[13] R. Liao, J. Hao, G. Chen, Z. Ma, and L. Yang, "A comparative study of physicochemical, dielectric and thermal properties of pressboard insulation impregnated with natural ester and mineral oil," IEEE Trans Dielectr Electr Insul, vol. 18, 2011.

[14] N. Azis and Z. Wang, "Acid generation study of natural ester," in XVII International Symposium on High Voltage Engineering, 2011, pp. 22-26.

[15] L. Lundgaard, W. Hansen, and S. Ingebrigtsen, "Ageing of mineral oil impregnated cellulose by acid catalysis," IEEE Trans Dielectr Electr Insul, vol. 15, pp. 540-546, 2008.

[16] H. Wilhelm, C. Santos, and G. Stocco, "Dissolved gas analysis (DGA) of natural ester insulating fluids with different chemical compositions," IEEE Trans Dielectr Electr Insul, vol. 21, pp. 1071-1078, 2014.

[17] T. Oommen, "Vegetable oils for liquid-filled transformers," IEEE Electr Insul Mag, vol. 18, pp. 6-11, 2002.

[18] "OECD: Principles and strategies related to the testing of degradation of organic chemicals."

[19] T. Oommen, C. Claiborne, E. Walsh, and J. Baker, "A new vegetable oil based transformer fluid: development and verification," in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000 Annual Report Conference on, 2000, pp. 308-312.

[20] D. Divakaran and C. Kalaivanan, "Investigation of lightning impulse voltage characteristics and other thermo-physical characteristics of vegetable oils for power apparatus applications," in Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 2012 IEEE 10th International Conference on the, 2012, pp. 1-4.

[21] J. Ong, "Biotemp, a sensible solution," ed: ABB, 2013.

[22] R. Martin, H. Athanassatou, J. C. Duart, C. Perrier, I. Sitar, J. Walker, et al., "Experiences in service with new insulating liquids," Working Group A2-35 CIGRE, pp. 1-95, 2010.

[23] R. Badent, M. Hemmer, and A. Schwab, "Inhibited rape-seed oil as substitute for mineral oils," in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002 Annual Report Conference on, 2002, pp. 268-271.

[24] I. Hosier, A. Vaughan, and F. Montjen, "Ageing of biodegradable oils for high voltage insulation systems," in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference on, 2006, pp. 481-484.

[25] M. A. G. Martins, "Vegetable oils, an alternative to mineral oil for power transformers-experimental study of paper aging in vegetable oil versus mineral oil," IEEE Electr Insul Mag, vol. 26, pp. 7-13, 2010.

[26] D. Martin, N. Lelekakis, W. Guo, and Y. Odarenko, "Further studies of a vegetable-oil-filled power transformer," IEEE Electr Insul Mag, vol. 27, 2011.

[27] M. Hikita, J. Tokiyoshi, M. Tsuchie, M. Kozako, T. Suzuki, A. Kanetani, et al., "Partial discharge properties of ester oils having different molecular structures," in Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on, 2012, pp. 26-29.

[28] P. S. Pakianathan and M. Rajamani, "Enhancement of critical characteristics of vegetable oil and used mineral oil of power transformer," in Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2013 International Conference on, 2013, pp. 648-652.

[29] "Vegetable oil-filled transformers for a sustainable future," 2008.

[30] "Vegeta-Biodegradable oil immersed transformers."

[31] G. John and W. Robert, "Utilities turning to vegetable oil-based transformer fluids."

[32] A. Ciuriuc, P. V. Notingher, M. Jovalekic, and S. Tenbohlen, "Experimental study on vegetable and mineral transformer oils properties," in Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2014 International Conference on, 2014, pp. 169-174.

[33] Y. Xu, S. Qian, Q. Liu, and Z. Wang, "Oxidation stability assessment of a vegetable transformer oil under thermal aging," IEEE Trans Dielectr Electr Insul, vol. 21, pp. 683-692, 2014.

[34] A. Ciuriuc, P. Notingher, R. Setnescu, L. Dumitran, and T. Setnescu, "Lifetime estimation of vegetable oil for transformers," in High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2014 International Conference on, 2014, pp. 1-4.

[35] B. SM, A. U U, Y. Robia, and N. Amir, "Use of natural vegetable oils as alternative dielectric transformer coolants," 2006.

[36] M. Rafiq, Y.Z.Lv, Y.Zhou, K.B.Ma, W.Wang, C.R.Li, Q.Wang, "Use ofvegetableoilsastransformeroils– a review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 52, pp. 308 -324, 2015.

[37] Y. Z. Arief, M. H. Ahmad, K. Lau, N. A. Muhamad, N. Bashir, N. K. Mohd, et al., "A comparative study on the effect of electrical ageing on electrical properties of palm fatty acid ester (PFAE) and FR3 as dielectric materials," in Power and Energy (PECon), 2014 IEEE International Conference on, 2014, pp. 128-133.

[38] J. Ulrych, M. Svoboda, R. Polanský, and J. Pihera, "Dielectric analysis of vegetable and mineral oils," in Dielectric Liquids (ICDL), 2014 IEEE 18th International Conference on, 2014, pp. 1-4.

[39] R. Radhika, M. W. Iruthayarajan, and P. S. Pakianathan, "Investigation of critical parameters of mixed insulating fluids," in Circuit, Power and

Computing Technologies (ICCPCT), 2014 International Conference on, 2014, pp. 357-362.

[40] A. Susilo, J. Muslim, Y. Z. Arief, N. A. Muhamad, M. Hikita, M. Kozako, et al., "Comparative study of partial discharge characteristics and dissolved gas analysis on palm-based oil as insulating material," in Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 2014 International Conference on, 2014, pp. 232-236.

[41] R. Villarroel, D. Garcia, B. García, and J. Burgos, "Moisture diffusion coefficients of transformer pressboard insulation impregnated with natural esters," IEEE Trans Dielectr Electr Insul, vol. 22, pp. 581-589, 2015.