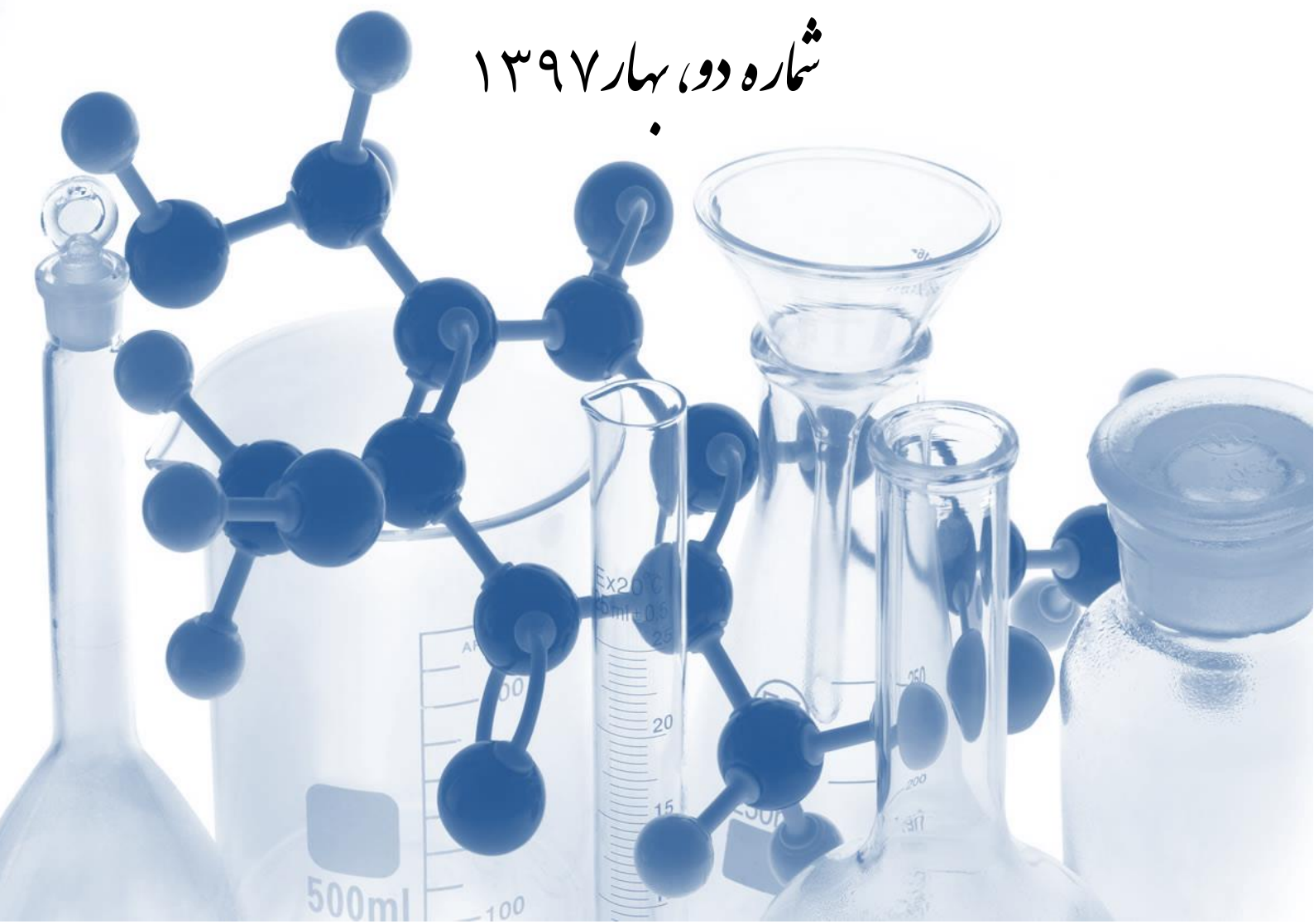




برونداد تخصصی گروه پژوهشی شیمی و فرآیند

شماره دو، بهار ۱۳۹۷



بروندادهای تخصصی

گروه پژوهشی شیمی و فرایند

صاحب امتیاز: پژوهشگاه نیرو

مدیر مسئول: مهندس مهدی صالحی راد

سر دبیر: دکتر زینب نوروزی تیسه

مدیر اجرایی: دکتر زینب نوروزی تیسه

گرافیکست و صفحه آرا: دکتر زینب نوروزی تیسه

ویراستار: مهندس سید احمد احمدی

عکس روی جلد: دکتر امیرحسین خلیلی

➤ همکاران این شماره:

همکاران گروه: مهندس سید احمد احمدی،

دکتر امیرحسین خلیلی گرکانی، مهندس طیبه

سعدالدین، مهندس علی سبزی، مهندس مهدی

صالحی راد، دکتر زینب نوروزی تیسه

همکاران معاونت پژوهشی: دکتر مسعود

حسنی، نوشین فرودی

➤ ناشر:

نشانی الکترونیکی: estdept@nri.ac.ir

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای پونک باختری،

پژوهشگاه نیرو، گروه سازه‌های صنعت برق

تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۷۹۴۴۶

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۳۶۱۶۰۳

اعضای هیأت تحریریه:

دکتر امیرحسین خلیلی گرکانی، مهندس طیبه

سعدالدین، مهندس علی سبزی، مهندس مهدی

صالحی راد، دکتر زینب نوروزی تیسه

اعضای هیأت داوران:

مهندس سید احمد احمدی، دکتر امیرحسین خلیلی

گرکانی، مهندس مهدی صالحی راد، دکتر افسانه

سادات لاریمی، دکتر هدی مولوی، دکتر زینب

نوروزی تیسه

اهداف و رویکرد:

«بروندادهای تخصصی گروه پژوهشی شیمی و فرایند» با هدف فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات و انتشار مطالب مرتبط با مواد و فرایندهای شیمیایی مورد استفاده در بخش‌های مختلف صنعت برق به صورت داخلی منتشر می‌شود.

این مجموعه از هرگونه پیشنهاد یا انتقاد برای

هرچه بهتر شدن مطالب استقبال می‌کند و استفاده

از مطالب آن با ذکر منبع بلامانع است.

مسئولیت مطالب، مقالات و پژوهش‌های درج

شده بر عهده نویسندگان است.

• سخن سردبیر	۱
• تکنولوژی الکترولیز در تولید هیدروژن	۲
• مروری بر روغن های ترانسفورماتور پایه گیاهی	۱۶
• Preparation, Characterization and Properties of Magnetically Aligned Hexagonal Boron Nitride Nanosheets/Epoxy Nanocomposites	۳۲
• معرفی آزمایشگاه مرجع رنگ و پوشش گروه پژوهشی شیمی و فرایند	۴۲

سخن سردبیر

سپاس خدایی را که اوّل و آخر وجود است، بی آنکه اوّلی بر او پیشی بگیرد یا آخری پس از او باشد؛ امروزه، تحقیق و پژوهش و دستیابی به علوم و فناوری های نوین از ارکان پیشرفت و توسعه صنعتی و اقتصادی است. بنابراین انتشار این دستاوردها نقش موثری در پیشبرد اهداف تکنولوژی خواهد داشت. نشریه حاضر دومین شماره برونداد تخصصی گروه پژوهشی شیمی و فرایند است که با تلاش پژوهشگران گروه تهیه و گردآوری شده است. توسعه دانش فنی ساخت مواد شیمیایی و تجهیزات مورد استفاده در صنعت برق، توسعه روش های بهره برداری از نیروگاه ها، افزایش راندمان حرارتی و توسعه دانش فنی مانتورینگ تجهیزات صنعت برق با استفاده از روش های شیمیایی از مهم ترین اهداف این گروه است. به طور کلی محورهای تخصصی گروه پژوهشی شیمی و فرایند عبارت است از:

- ❖ کنترل شیمیایی و تصفیه آب نیروگاه
- ❖ روغن، کاغذ و گازهای عایقی
- ❖ سوخت
- ❖ سامانه های ذخیره کننده انرژی الکتریکی - حرارتی از طریق فرایندهای شیمیایی
- ❖ روانکارها
- ❖ رنگ و پوشش های آلی نوین
- ❖ نانو شیمی

در این راستا، ایجاد ارتباط موثر با دانشگاه ها و مراکز صنعتی، مدیریت دانش، پژوهش و شناسایی فناوری های نوین و تهیه و تدوین سندهای راهبردی و نقشه راه از مهم ترین وظایف این گروه پژوهشی است. امید است با همکاری اعضای محترم هیات تحریریه، هیات داوران و پژوهشگران این حوزه انتشار برونداد تخصصی گروه شیمی در قالب فصلنامه ادامه یابد و بدین ترتیب گامی موثر در ارتقا سطح دانش و پژوهش برداشته شود. در این مجال از کلیه همکاران گرامی، خوانندگان ارجمند و صاحب نظران اندیشمند تقاضا می شود با راهنمایی مشفقانه خویش ما را در ادامه مسیر یاری فرمایند.

زینب نوروزی تپسه

گروه پژوهشی شیمی و فرایند

تکنولوژی الکترولیز در تولید هیدروژن

امیرحسین خلیلی گرکانی^۱

چکیده:

غالباً از هیدروژن به عنوان راه حل نهایی برای چالش‌های متعدد ناشی از گرم شدن کره زمین و کمبود سوخت‌هایی چون نفت و گاز یاد می‌شود. امروزه بیشترین هیدروژن تولید شده در سطح جهان از سوخت‌های فسیلی بدست می‌آید، زیرا این روش تا به امروز مقرون به صرفه‌ترین روش بوده است. اما برای جلوگیری از مشکلات ناشی از آلودگی هوا و محدود بودن منابع مورد استفاده در روش‌های تولید هیدروژن مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، هیدروژن را باید از آب استخراج کرد. امروزه رویکردهایی پیرامون سیستم‌های انرژی که مبتنی بر سوخت فسیلی نباشد در حال شکل‌گیری است و ایده استفاده از یک سیستم مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر که احتمالاً با برخی از اشکال انرژی اتمی ترکیب شده باشد، بیش از پیش مقبولیت یافته است. رویکرد رو به افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس صنعتی و همچنین روش‌هایی جهت ذخیره سازی در مقیاس بالا نیاز اصلی این صنعت است تا بتواند نوسانات ناشی از منابع انرژی مانند باد و نور خورشید را جبران نماید. علاوه بر این، بخش حمل و نقل به سوختی نیاز دارد که سال‌های متمادی و شاید تا ابد بتواند از آن استفاده کند. در سیستم‌های آبی انرژی، تبدیل انرژی الکتریسته به سوخت اجتناب ناپذیر است و هیچ اهمیتی ندارد که این سوخت هیدروژن خالص باشد یا سوخت‌های سنتزی (متانول، متان، گازوئیل و ...). قدم اول عبارت است از تولید هیدروژن از تفکیک آب است. اگرچه برای تفکیک آب روش‌های متعددی وجود دارد، اما تنها روش عملی برای این فرآیند در مقیاس بزرگ و صنعتی، الکترولیز آب است.

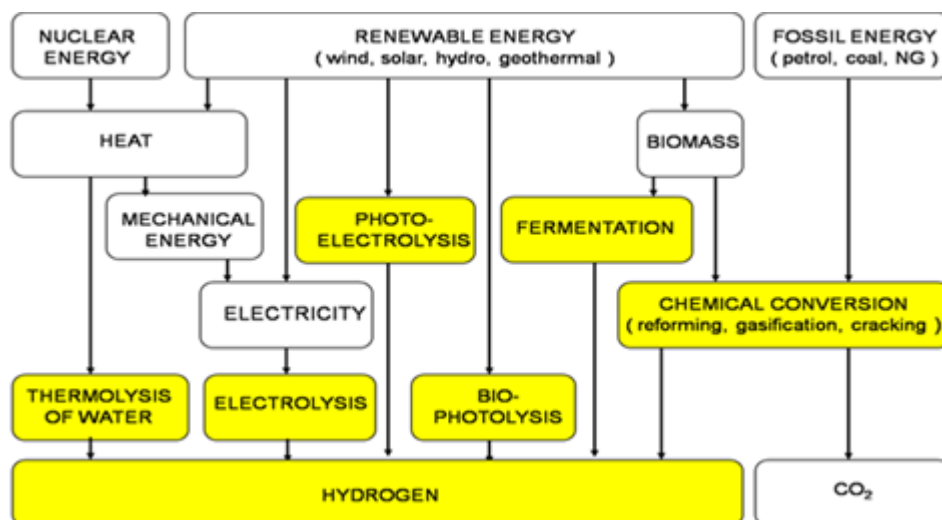
کلمات کلیدی: الکترولیز، هیدروژن، سوخت جایگزین

^۱عضو هیئت علمی گروه شیمی و فرایند، Akhalili@nri.ac.ir

روش‌های تولید هیدروژن:

هیدروژن یک جز لاینفک سوخت‌های هیدروکربنی مانند نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ است و پس از اتمام این منابع انرژی تجدیدناپذیر به عنوان سوخت مورد استفاده قرار خواهد گرفت. این عنصر همچنین در مقادیر زیاد به عنوان یک واسطه صنعتی در تولید آمونیاک، کودها، متانول و مواد شیمیایی دیگر و نیز در پالایش نفت خام مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از بحران نفتی اپک در اوایل دهه ۷۰ و نیز با افزایش آگاهی درباره محدود بودن منابع طبیعی هیدروکربنی، محققان در سرتاسر جهان برای توسعه روش‌های بهبود یافته و جدید جهت تجزیه آب یعنی تنها منبع تجدیدپذیر و مهم هیدروژن که امروزه موجود است دست بکار شده‌اند.

دامنه روش‌های بررسی شده، گستره وسیعی از الکترولیز تا روش‌های فوتوشیمیایی و حرارتی را پوشش می‌دهد و تا زمانی که در این حوزه‌ها پیشرفت حاصل نشود الکترولیز آب آکالاین بیشترین پتانسیل تجاری کوتاه مدت را برای بازیافت هیدروژن از آب در مقیاس‌های بزرگ صنعتی دارد. در شکل زیر انواع روش‌های تولید هیدروژن آورده شده است:



شکل ۱- انواع روش‌های تولید هیدروژن

برخی از این روش‌ها با توجه به آلودگی زیست محیطی کمتر و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی باد، خورشید، ...) بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

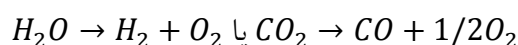
اصول الکترولیز:

تاکنون انواع مختلفی از سلول‌های الکترولیز پیشنهاد و ساخته شده‌اند. سلول‌های الکترولیز مختلف بر مبنای نوع الکترولیت به چندین گروه تقسیم می‌شوند. در جدول ۱ نمای کلی انواع مختلف سلول‌ها آورده شده است. تمام سلول‌های نشان داده شده در جدول ۱ می‌توانند برای تولید H_2 از آب به عنوان واکنش‌دهنده استفاده کنند. اما بهر حال تنها سلول اکسید جامد است که می‌تواند از CO_2 برای تولید O_2 استفاده کند.

جدول ۱- انواع سلول‌های الکترولیز و مشخصات آنها [۱]

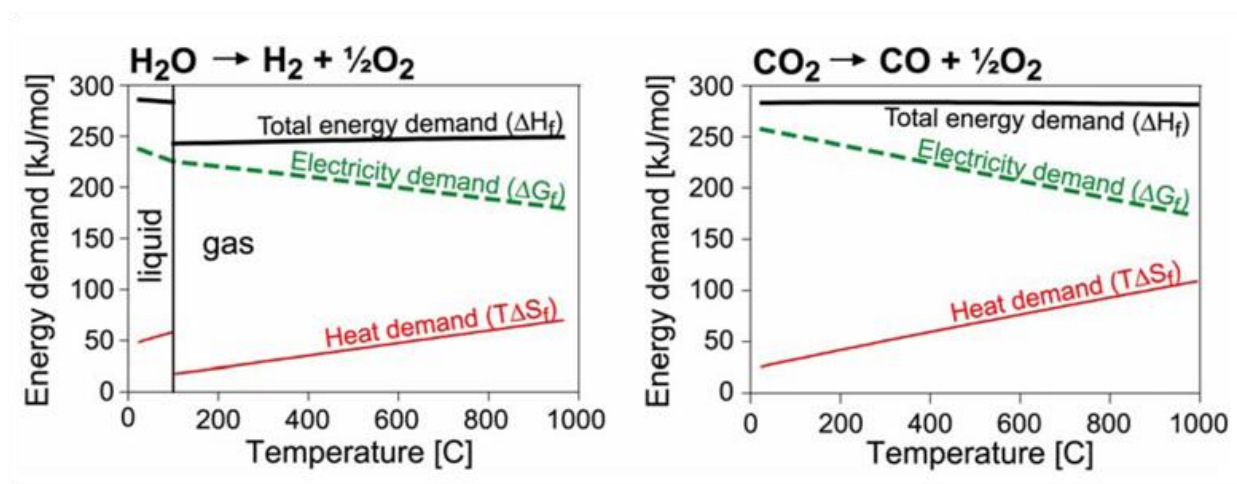
Type	Alkaline	Acid	Polymer electrolyte	Solid oxide
Charge carrier	OH^-	H^+	H^+	O^{2-}
Reactant	Water	Water	Water	Water, CO_2
Electrolyte	Sodium or Potassium hydroxide	Sulphuric or Phosphoric acid	Polymer	Ceramic
Electrodes	Nickel	Graphite with Pt, polymer	Graphite with Pt, polymer	Nickel, ceramics
Temperature	80 °C	150 °C	80 °C	850 °C

واکنش کلی الکترولیز:



مجموع دو واکنش الکتروشیمیایی (واکنش‌های نیم سلولی) است که در الکترودها اتفاق می‌افتد. الکترودی که واکنش‌دهنده‌ها در آن کاهش^۱ می‌یابند یا واسطه‌ها^۲ تولید می‌شوند، کاتد نامیده می‌شود. آند، الکترودی است که اکسیداسیون واکنش‌دهنده‌ها یا واسطه‌ها در آن اتفاق می‌افتد.

واکنش الکترولیز H_2O یا CO_2 شدیداً گرماگیر است و با افزایش دما به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (مطابق شکل ۲)، تا جایی که بخش مهمی از تقاضای انرژی کل در دماهای بالا را می‌توان به صورت گرما تأمین کرد. این کار فرصتی را فراهم می‌آورد که بتوان از گرمای ژول که به دلیل عبور جریان الکتریکی از سلول تولید می‌شود و اجتناب ناپذیر است، استفاده کرد. در این صورت مصرف کلی الکتریسیته و هزینه تولید H_2 و یا CO کاهش می‌یابد.



شکل ۲- ترمودینامیک الکترولیز H_2O و CO_2 را در ۰/۱ MPa [۲]

ولتاژ ترمو- نوترال^۳ به صورت زیر تعریف می‌شود:

^۱ Reduction

^۲ Intermediates

^۳ Thermo-neutral voltage

$$E_{Tn} \equiv \frac{\Delta H_f}{nF} = \frac{\Delta G_f}{nF} + \frac{T\Delta S_f}{nF} \quad (1)$$

که در آن ΔH_f ، تغییر آنتالپی تشکیل، ΔG_f تغییرات انرژی آزاد گیبس، ΔS_f تغییر آنتروپی تشکیل، T دما برحسب کلوین، n تعداد الکترونهای موجود در واکنش الکترولیز و F ثابت فارادی است. در نتیجه اگر ولتاژ سلول برابر E_{Tn} باشد، تمام گرمای ژول تولید شده مصرف می شود. اگر ولتاژ سلول بیشتر از E_{Tn} باشد، سلول گرمای اضافی تولید می کند. اگر ولتاژ سلول کمتر باشد، گرمای تولید شده پاسخگوی تقاضای گرما نبوده و اگر گرما از طریق دیگر تامین نگردد، سلول شروع به سرد شدن می کند (کاهش دما). E_{Tn} در ۰/۱ MPa و در دمای 25°C برای هر دو واکنش الکترولیز H_2O و CO_2 برابر ۱/۴۸ ولت است. در دمای 95°C ، این ولتاژ برابر ۱/۲۹ ولت و ۱/۴۶ ولت است. به همین دلیل، الکترولیز ترکیب H_2O و CO_2 در دمای 950°C را می توان در شرایط ترمو-نوترال و در ولتاژ سلولی بین ۱/۲۹ ولت و ۱/۴۶ ولت انجام داد که این ولتاژ بسگی به نسبت الکترولیز $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ دارد.

کارایی:

کارایی (η) یک فرآیند الکترولیز را می توان به صورت بیشترین ارزش گرمایی^۱ (HHV) یک مول از محصول تقسیم بر میزان مصرف انرژی (W) مورد استفاده برای تولید یک مول محصول محاسبه کرد.

البته طبیعتاً کارایی بالاتر مزیت محسوب می شود اما مقرون به صرفه بودن تولید معمولاً مهم تر است. برای بهینه سازی هزینه تولید، میزان تولید باید افزایش یابد. هرچه ولتاژ سلول از $\mathcal{E}$ بالاتر رود، شدت جریان افزایش یافته و در نتیجه سرعت تولید نیز بالا می رود. هنگامی که ولتاژ سلول از E_{Tn}^0 بالاتر می رود، گرمای اضافی تولید شده

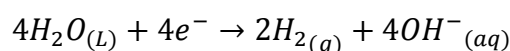
¹Higher Heating Value

و کارایی کاهش می‌یابد. امروزه سلول‌های آلکالاین در ساده‌ترین حالت، شامل دو الکترود هستند که معمولاً در ولتاژ تقریبی ۱/۹ ولت یا بالاتر عمل می‌کنند تا هزینه تولید بهینه‌شود.

انواع الکترولایزرها:

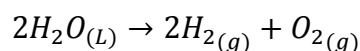
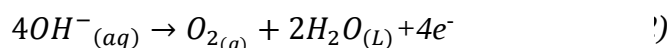
تمام الکترولایزرها در ساده‌ترین حالت شامل دو الکترود هستند که توسط الکترولیت از هم جدا شده‌اند. واکنش نیم سلولی ناشی از تشکیل هیدروژن و اکسیژن به طور مجزا در هر کدام از الکترودها انجام می‌شود. نقش الکترولیت، بستن مدار الکتریکی به وسیله حرکت دادن یون‌ها (نه الکترودها) بین الکترودهاست. علاوه بر این گازهای تولید شده را نیز از هم جدا می‌کند. الکترولایزهای الکالاین (AEC) نشان دهنده تکنولوژی توسعه یافته‌ای هستند که به نوعی استاندارد حال حاضر برای الکترولایزهای در مقیاس بزرگ محسوب می‌شوند. در این سیستم‌ها جنس آند و کاتد معمولاً از فولاد دارای روکش نیکل یا خود فولاد است. الکترولیت مورد استفاده در این سیستم‌ها از نوع مایع است که مبتنی بر یک محلول KOH بسیار محرق^۱ می‌باشد. حامل شارژ یونی^۲، یون هیدروکسید (OH^-) است و یک غشای متخلخل برای یون هیدروکسید (نه برای جداسازی گازهای هیدروژن و اکسیژن) مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزایای اصلی این تکنولوژی، تکامل یافته بودن و نیز دوام آن است. معایب اصلی نیز عبارتند از استفاده بسیار زیاد از الکترولیت محرق و عدم توانایی در تولید هیدروژن در فشار بالا برای ذخیره‌سازی که منجر به استفاده از یک کمپرسور خارجی و افزایش هزینه و پیچیدگی سیستم می‌شود [۳].

واکنش‌های سلولی عبارتند از:



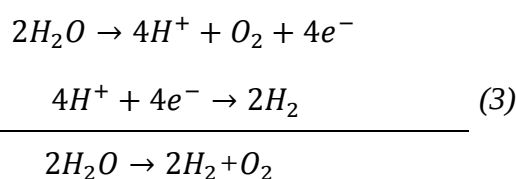
^۱ Highly caustic

^۲ Toniccharge carrier



الکترولیت، یک حلال بازی در آب است (معمولاً هیدروکسید پتاسیم ۳۰٪). این الکترولیت در یک تفکیک کننده متخلخل که به طور نسبی از آزبست ساخته شده است نگهداری می شود. الکترودها از جنس نیکل (یا صفحات آبکاری شده با نیکل) که کاتالیزور (کاتالیست) روی آن اعمال می شود. کاتالیست می تواند فلزات نجیب، مانند پلاتینیوم، رودیوم، یا ایریدیوم باشد، اما گزینه های زیادی از میان کاتالیست های غیرنجیب نیز وجود دارند. قسمت اصلی این گزارش به بازبینی اطلاعات بیشتری پیرامون مواد مورد استفاده برای الکترودها و کاتالیست ها می پردازد. جزئیات این گزارش را نمی توان در این جا به طور خلاصه بیان کرد. بیشتر الکترولایزرهای آب، هیدروکسید پتاسیم صنعتی از الکترودهای نیکل استفاده کرده و در دمای ۷۰-۸۰ درجه سانتیگراد عمل می کنند. افزایش دمای عملیات بر ترمودینامیک سیستم اثر می گذارد. در مورد الکترولایزرهایی که در دمای بالاتر از ۱۵۰ درجه سانتیگراد عمل می کنند، اطلاعات محدودی وجود دارد. افزایش دمای عملیات برای الکترولیز آب آکالاین از حرارت معمولی ۸۰ درجه به بالای ۲۰۰ درجه سانتیگراد می تواند کارایی الکتریسیته به هیدروژن را به طور قابل ملاحظه ای افزایش دهد. ثبات کمتر فلزات، یک مانع احتمالی برای کار کردن در دمای بالاتر است. توسعه و ساخت فلزات مناسب برای سلول جهت توسعه و ساخت یک دستگاه الکترولیز آب در مقیاس بزرگ و برای کار در دمای بالا ضروری است. در حال حاضر سلول و مواد جداکننده مناسب احتمالی شناسایی شده اند که از الکترولایزر آکالاین در دمای پایین گرانتر نیستند، اما ثبات در درازمدت آنها هنوز به اثبات نرسیده است [۳].

الکترولایزرهای پلیمری یا الکترولایزرهای غشایی تبادل کننده پروتون^۱ (PEMEC) در اطراف یک الکترولیت پلیمری هادی پلیمر ساخته شده‌اند. الکترودها عبارتند از:



غالباً از تکنولوژی غشایی تبادل کننده پروتون^۲ (PEM) به عنوان جایگزینی جذاب برای الکترولیز آب آکالاین یاد می‌شود. الکترولیز آب با استفاده از سیستم‌های غشایی تبادل کننده پروتون نسبت به تکنولوژی‌های سنتی دارای مزایای متعددی هستند که عبارتند از بازدهی بالاتر انرژی، سرعت تولید بیشتر و طراحی فشرده‌تر.

- مزایای سلول های نوع پلیمر جامد:

الف: غشای الکترولیت و یا دیافراگم می‌تواند بسیار نازک ساخته شود که باعث هدایت پذیری بیشتر شده، بدون آنکه ریسک عبور گاز از غشا وجود داشته باشد.

ب: الکترولیت ثابت بوده و نمی‌تواند از سلول خارج شود. همچنین این نوع سلول‌ها از لحاظ زیست محیطی پاک هستند و هزینه برق و حجمی اشغالی بسیار کمی دارند و این مسأله بسیار حائز اهمیت است. درجه خلوص بالا

^۱ Proton exchange membrane electrolyzers

^۲ Proton exchange membrane

و قابلیت حصول گازهای فشرده بطور مستقیم و افزایش سطح ایمنی از دیگر مزایای این نوع سلولها محسوب می شود.

- معایب سلول الکترولیت پلیمر جامد:

الف: هزینه الکترولیت از محلولهای آلكالاین سنتی بیشتر است.

ب: الکترولیت خاصیت خوردندگی دارد و بنابراین لازم است که از قطعات فلزی گرانتری در سلول استفاده شود. به همین دلیل، سلولهای الکترولیت پلیمر جامد نسبت به دیگر سلولهایی که از یک الکترولیت آلكالاین مایع استفاده می کنند معمولاً با چگالی جریان^۱ بالاتری کار می کنند.

معمولاً از الکتروکاتالیستهای مختلفی برای آند (مثلاً IrO_2) و کاتد (Pt) استفاده می کنند. هنگامی که لایه های الکتروکاتالیست به غشا متصل می شود، به عنوان جمع آوری کننده الکترون غشایی^۲ (MEA) شناخته می شود. این غشا حاوی یک فلوروپلیمر جامد^۳ است که قسمتی از آن به صورت شیمیایی تغییر یافته است به نحوی که حاوی گروه اسیدهای سولفونیک باشد (SO_3H) که هیدروژن خود را به آسانی و به صورت اتمهای با بار مثبت یا همان پروتونها آزاد می کنند. تکنولوژی الکترولیز PEM دارای زمان پاسخدهی سریع و قابلیت روشن/ خاموش است. در شرایط محیطی، تولید هیدروژن به سرعت آغاز می شود [۳].

برخی از سلولهای الکتروکاتالیز اکسید جامد (SOEC) توسعه یافته و آزمایش شده، نشان داده اند که این مدل دارای بهترین کارایی الکترولیز CO_2 است که تاکنون برای یک سلول الکترولیز گزارش شده است. به طور کلی، دلیل اصلی کارایی بالای تکنولوژی SOEC در مقایسه با دیگر تکنولوژیهای الکترولیز، دمای بالا (۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه

^۱ Current density

^۲ Membrane electrode assembly

^۳ Solid fluoropolymer

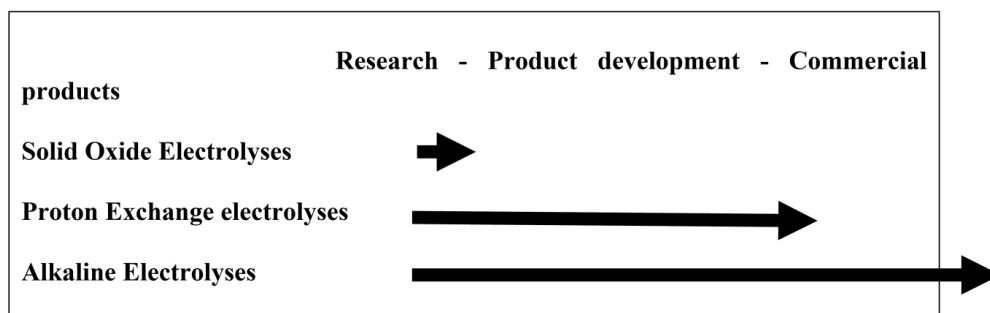
سانتیگراد) است زیرا هر دو واکنش الکترولیز CO_2 و H_2O به طور فزاینده‌ای گرماگیر است و خسارات ناشی از مقاومت در SOEC ها با افزایش دما، کاهش می‌یابد. این کارایی بالا امکان بالقوه تولید CO و H_2 را فراهم می‌کند. بازدهی الکتریسیته به سوخت در حدود ۹۰٪ به نظر واقعی می‌رسد. تخمین‌ها پیرامون میزان هزینه CO و H_2 که مبتنی بر کارایی اندازه‌گیری شده و فرضیات خاص اقتصادی است، نشان می‌دهد که هزینه‌های تولید CO و H_2 با وجود قیمت‌های کنونی نفت خام، قابل رقابت است. هزینه تولید H_2 ، $\$71/\text{kg}$ است که معادل قیمت ۳۰ دلاری هر بشکه نفت خام با استفاده از HHV می‌باشد. هزینه تولید CO نیز $\$5/6/\text{kg}$ برابر با نفت خام بشکه‌ای ۳۴ دلاری با استفاده از HHV می‌باشد. قسمت اعظم هزینه تولید ناشی از هزینه الکتریسیته برای انجام عملیات الکترولیز است. ترکیب $\text{CO} + \text{H}_2$ (گاز سنتز) را می‌توان با استفاده از کاتالیست به انواع مختلف سوخت‌های سنتزی نظیر متانول، DME (دی متیل اتر) و متان تبدیل کرد. در روش تولید سوخت‌های سنتزی می‌توان با استفاده از گرمای حاصل از واکنش کاتالیست برای تولید بخار و کاهش هزینه‌های تولید بهره برد.

برای سنتز سوخت‌های ارگانیک به یک منبع کربن نیاز داریم. در کوتاه مدت، این منبع می‌تواند گازهای سوختی واحدهای تولید برق سنتی (و یا احتراق سوخت اکسیژنی^۱ یعنی احتراق سوخت‌ها با اکسیژن بدست آمده از الکترولیزرها) باشد. در بلند مدت نیز باید به جمع‌آوری CO_2 از اتمسفر پرداخت. برای جمع‌آوری CO_2 از سیستمی استفاده می‌شود که به بررسی آن خواهیم پرداخت. این سیستم شامل یک مدار بسته است که در آن CO_2 ، $\text{Ca}(\text{OH})_2$ موجود در اتمسفر را جذب می‌کند و CaCO_3 تولید می‌شود، سپس با استفاده از حرارت، CO_2 با غلظت خالص بدست می‌آید. باقیمانده نهایی (CaO) نیز با جذب آب به $\text{Ca}(\text{OH})_2$ تبدیل می‌شود.

^۱ Oxyfuel

الکترولایزرهای تجاری موجود:

تکنولوژی و اندازه الکترولایزرهای تجاری موجود بسیار متنوع است. بازبینی کارآیی، تنها الکترولایزرهای آلکالاین را پوشش می دهد زیرا آنها تنها الکترولایزرهایی هستند که برای تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ به کار می روند.



شکل ۳- شمای گرافیکی مرحله توسعه انواع مختلف الکترولایزرها

شش تأمین کننده عمده الکترولایزرهای آلکالاین در زیر آورده شده است:

IHT در سوئیس	Hydrogenics در بلژیک	Norsk Hydro در نروژ
Erre Due در ایتالیا و نمایندگی آن	Uralkhimash در روسیه	Accagen در سوئیس
H ₂ Industrial در دانمارک		

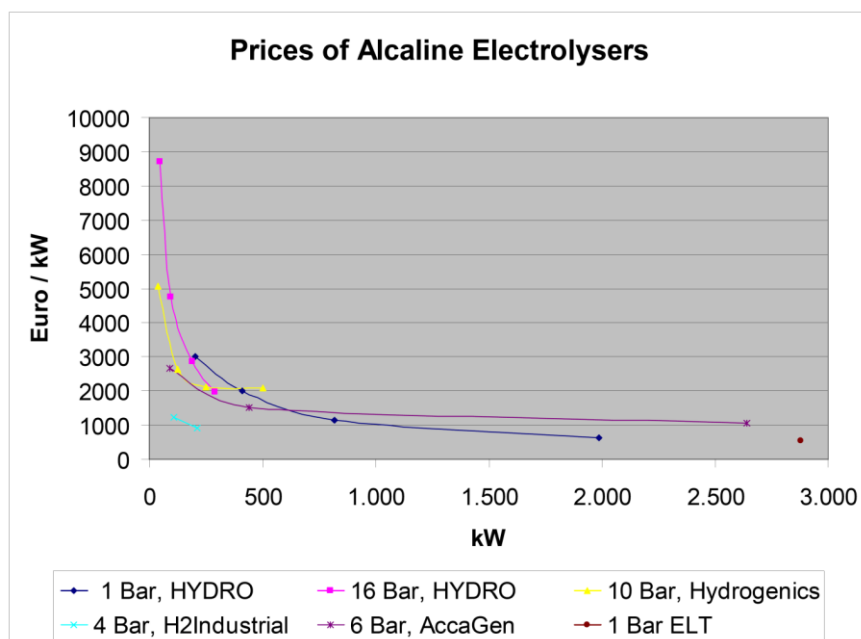
دستگاهها را می توان به دو گروه تقسیم بندی کرد: دستگاههای اتمسفری و تحت فشار. دستگاههای اتمسفری در فشار ۱ بار کار می کنند و دستگاههای تحت فشار نسبت به چگونگی ساختارشان در فشارهای ۴ تا ۳۰ بار کار می کنند.

جدول ۲- الکترولایزرهای با ظرفیت بالا از شرکت های مذکور [۴-۹]

Western Supplier	Atmospheric plants	Pressure plants
Hydro	200 to 2000 kW	50 to 300 kW
Hydrogenics		60 to 240 kW

IHT	14 to 1500 kW	500 to 3400 kW
AccaGen		7 to 500 kW
Erre Due		100 to 200 kW
Uralkhimash	1520-3150 kW	20-1250 kW

الکترولایزرها به دارا بودن هزینه سرمایه گذاری بالا مشهورند. این حقیقتی انکار ناپذیر است ولی هنگامی که قیمت به ازای هر کیلو وات (KW) یک الکترولایزر خاص بیان می شود، اندازه دستگاه داده نمی شود. قیمت مخصوص الکترولایزرها (Euro/kw) شدیداً به اندازه دستگاه بستگی دارد. تحلیل قیمت نشان داده شده در شکل ۴ این مطلب را به وضوح نشان می دهد. می توان مشاهده کرد که قیمت به ازای هر کیلو وات ظرفیت نصب شده با یک ضریب ۱۰ نسبت به اندازه دستگاه تغییر می کند. وجود H_2 برای تولید متانول ضروری است. این فرآیند در فشار تخمینی حداقل ۷۰ بار اجرا می شود که بدین معناست که تولید هیدروژن با فشار بالا یک مزیت محسوب می شود. هزینه انرژی الکتریکی برای تولید هیدروژن بر مبنای زیر محاسبه شده است: قیمت های واقعی برق در سال (متغیر) و قیمت بزرگترین الکترولایزر موجود در این تحقیق. استهلاك الکترولایزر در طول ۱۰ سال، کارایی ۷۵٪ (HHV). بنابراین هزینه تولید هیدروژن بین ۰/۰۸\$/kw و ۰/۰۸۵ برای استفاده ۲۵ تا ۱۰۰ درصدی از الکترولایزر متغیر است (تولید نیمه وقت در پایین ترین قیمت برق). اگر بهای اکسیژن و حرارت در محاسبه لحاظ شده بود، هزینه بین ۰/۰۶ \$/kw و ۰/۰۷ می شود. اگر کارآرایی الکترولایزر را به جای ۷۵٪، ۱۰۰٪ فرض می کردیم، در فواصل زمانی یکسان، هزینه بین ۰/۰۵\$/kw تا ۰/۰۵۵ می شود.



شکل ۴- قیمت های الکترولایزرها را به صورت تابعی از ظرفیت تولید

نتیجه گیری

به دلیل لزوم الکترولیز آب در سیستم های انرژی آتی، انتظار می رود در سال های آینده فعالیت های تحقیقاتی در این زمینه افزایش یابد. برخی از گروه های تحقیقاتی در ایران از هم اکنون به این حوزه وارد شده اند و بنابراین پایه خوبی برای توسعه الکترولیز در ایران بنا می کنند.

مراجع

- [1] Santos K. G., Eckert C. T., De Rossi E., Bariccatti R. A., Frigo E. P., Lindino C. A., Alves H. J. Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 68, 563-571 (2017).
- [2] Electrochemical Hydrogen Technologies, H. Vendt, Elsevier, Amsterdam (1990).
- [3] Kelly NA. Hydrogen production by water electrolysis. Adv. Hydrog. Prod, Storage Distrib. 6, 159-85 (2014).

- [4] www.uralhimmash.ru
- [5] www.h2industrial.com
- [6] www.accagen.com
- [7] www.iht.ch
- [8] <http://www.hydrogenics.com/>
- [9] <https://www.hydro.com/>

مروری بر روغن های ترانسفورماتور پایه گیاهی

زینب نوروزی تیسه^{۱*}، علی سبزی^۲

چکیده

روغن های ترانسفورماتور به عنوان عایق و خنک کننده در بسیاری از تجهیزات الکتریکی نظیر ترانسفورماتورها، خازن های ولتاژ بالا و انواع سویچ های ولتاژ استفاده می شوند. روغن های ترانسفورماتور اغلب پایه معدنی و نفتی هستند. کمبود منابع نفتی، تخریب محیط زیست، دشواری فرایندهای انهدام روغن های معدنی مصرف شده و سایر ملاحظات اقتصادی و ایمنی سبب شده است که تحقیقات بر روی تولید روغن های ترانسفورماتور پایه گیاهی و زیست تجزیه پذیر بطور چشمگیری افزایش یابد. در این مقاله، موقعیت کنونی روغن های ترانسفورماتور گیاهی شامل فرایندهای تولید، فرآوری و شناسایی این روغن ها مرور می شود؛ علاوه بر این مزایا، محدودیت ها و چالش های مربوط به روغن های ترانسفورماتور گیاهی نیز بررسی می شود.

واژه های کلیدی: روغن ترانسفورماتور گیاهی، مواد تجدیدپذیر، روغن زیست تجزیه پذیر.

مقدمه

روغن های ترانسفورماتور پایه معدنی، قرن هاست که به عنوان عایق و سیال خنک کننده استفاده می شود. اگرچه روغن های ترانسفورماتور پایه معدنی به علت محدودیت منابع معدنی و محدودیت در ذخیره سازی و سایر معایب نظیر غیرقابل تجزیه شدن توسط محیط زیست (کمتر از ۳۰٪) و نقطه اشتعال پایین، نگرانی هایی برای محققان و صنعتگران ایجاد کرده است [۱-۳]. روغن های گیاهی که به طور طبیعی از گیاهان بدست می آیند جایگزین مناسبی برای روغن های معدنی می باشند. روغن های ترانسفورماتور پایه گیاهی دارای خواص منحصر بفردی نظیر سمیت پایین، نقطه اشتعال بالا (بیشتر از ۳۰۰°C) قابلیت آتشگیری پایین، قابلیت زیست

^۱ دکترای شیمی آلی، گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، پست الکترونیک: znoroozi@nri.ac.ir

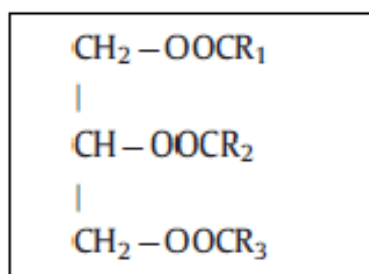
^۲ کارشناسی ارشد شیمی کاربردی، گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، پست الکترونیک: asabzi@nri.ac.ir

تجزیه پذیری بالا (بیشتر از ۹۵٪) و سازگاری با محیط زیست می باشند [۴ و ۵]. 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 کاملاً زیست تجزیه پذیر مورد توجه قرار گرفتند. اولین محصول تجاری روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی در سال ۱۹۹۹ گزارش شده است که پایه این روغن گیاهی حاوی ۸۰٪ اسید اولئیک بوده است [۶ و ۷]. سپس از تحقیقات در این زمینه ادامه یافت و موارد متعددی مبنی بر ساخت روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی گزارش شد [۸-۱۰]. در این مقاله نیز، موقعیت کنونی روغن‌های ترانسفورماتور گیاهی شامل فرایندهای تولید، فرآوری و شناسایی این روغن‌ها مرور می شود؛ همچنین مزایا، محدودیت‌ها و چالش‌های مربوط به روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی نیز بررسی می شود.

ساختار شیمیایی روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی

روغن‌های گیاهی به عنوان منابعی طبیعی به مقدار فراوان در دسترس می باشند [۱۱]. به طور کلی روغن‌های گیاهی از تری گلیسیریدها تشکیل می شوند و این روغن‌ها عموماً 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 دی الکتریک آن‌ها بسیار موثر است [۱۲ و ۱۳]. به علت واکنش هیدرولیز که در روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی رخ می دهد 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 عمدتاً شامل اسیدها با وزن

مولکولی بالا می‌باشند در حالیکه روغن‌های ترانسفورماتور پایه معدنی شامل اسیدها با وزن مولکولی پایین^۱ هستند [۱۴-۱۶]. ساختار مولکولی استرهای گلیسیرید در شکل ۱ نشان داده شده است به گونه ای که R_1, R_2, R_3 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

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*	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
Olive 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

¹ High molecular weight acid (HMA)

² Light molecular weight acid (LMA)

تولید و توسعه روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی

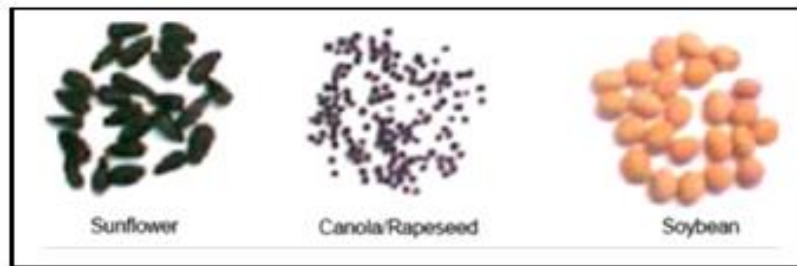
از آنجائیکه ساختار شیمیایی روغن‌های ترانسفورماتور گیاهی به گونه ای است که در مدت زمان کوتاهی تجزیه می‌شوند بنابراین برای مصارف بلند مدت نیاز به بهبود دارند. به‌طور کلی فرایند توسعه و بهبود این روغن‌ها چند مرحله ای است، مرحله نخست این فرایند، انتخاب روغن گیاهی مناسب است، مرحله بعد خالص سازی و غنی سازی 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.

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^۱ 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^۲ 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].

^۱Refined, Bleached and Deodorized Process (RDB)

^۲Winterization

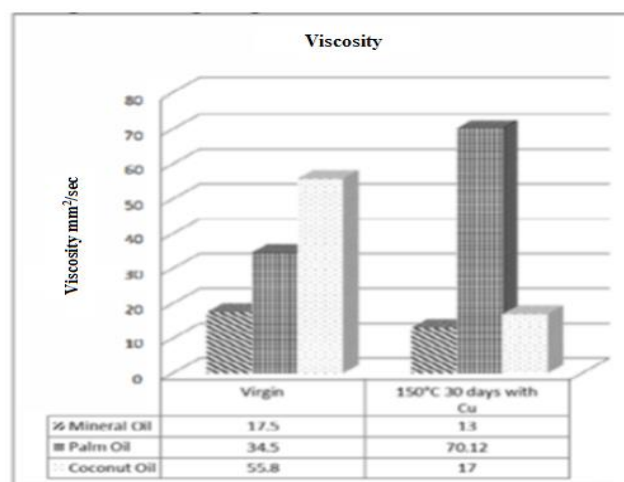


شکل ۲- انواع دانه‌های گیاهی متداول جهت ساخت روغن-های ترانسفورماتور

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 معمولاً در دمای بالاتر از 0°C به شکل مایع می‌باشد. روغن‌ها با درجه سیرنشده‌گی (غیراشباعی) زیاد در محدوده دمایی 15°C تا 30°C به صورت مایع هستند. در ادامه، طی فرایند غنی سازی و افزودن مواد افزودنی گوناگون به روغن خام فرایند تولید روغن‌های ترانسفورماتور کاربردی کامل می‌شود.

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 ترانسورماتور می شود. شکل ۳ ویسکوزیته انواع روغن‌های ترانسفورماتور را نشان می دهد [۲].



شکل ۳- ویسکوزیته انواع روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی و معدنی

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 15°C - تا 25°C است [۱۸].

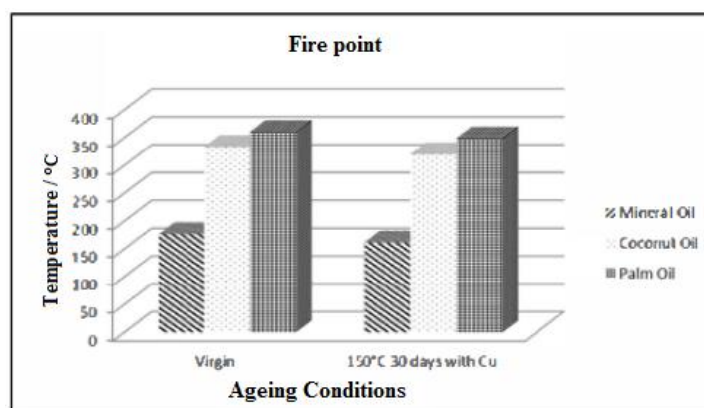
نقطه اشتعال

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 روغن‌های ترانسفورماتور در سالهای اخیر می باشد. به علت موارد بسیار آتشگیری روغن‌های ترانسفورماتور که قابل مهار نبوده است و سبب خسارات و صدمات جبران ناپذیری شده است لذا ساخت روغن‌های ترانسفورماتور

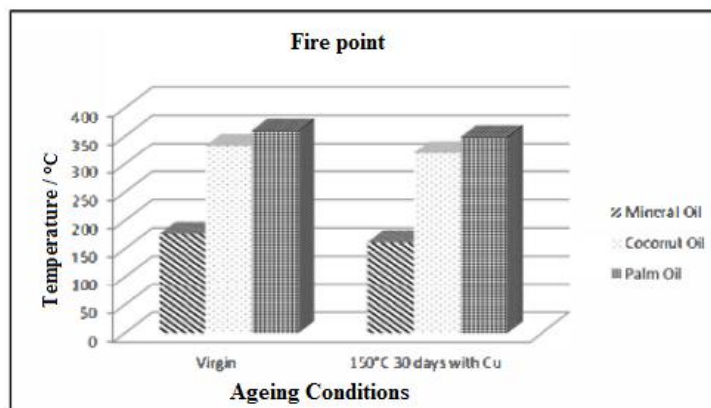
دارای نقطه اشتعال بالا بسیار حائز اهمیت است. همانگونه که جدول ۲ نشان می دهد روغن های ترانسفورماتور پایه گیاهی درمقایسه با سایر روغن های ترانسفورماتور دارای نقطه اشتعال بالاتری (بیشتر از 300°C) هستند [۱۹].

جدول ۲- مقایسه نقطه اشتعال و نقطه آتشگیری انواع روغن ها جهت ساخت روغن های ترانسفورماتور

Fluid type	Flash point	Fire point ($^{\circ}\text{C}$)	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



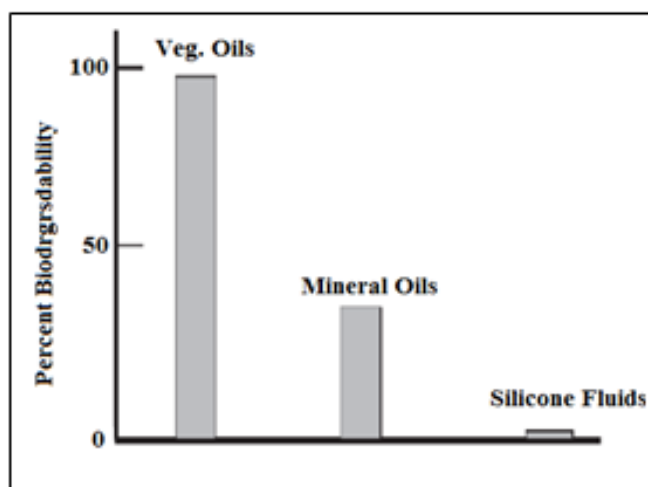
شکل ۴- مقایسه نقطه اشتعال انواع روغن های ترانسفورماتور پایه گیاهی و معدنی [۲۰]



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

پایداری و قابلیت تجزیه پذیری

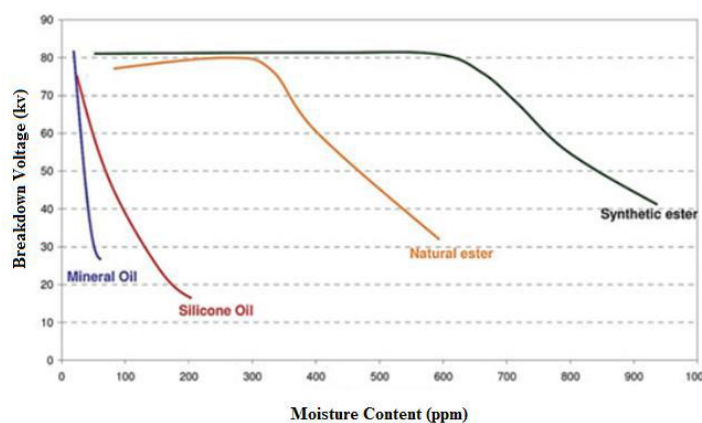
روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی تجزیه پذیر هستند و این خصوصیت دارای مزایا و معایبی می‌باشد. از آنجاییکه این دسته از روغن‌ها در مقایسه با روغن‌های ترانسفورماتور پایه معدنی دارای قابلیت تجزیه پذیری بالایی هستند و بسیار مستعد اکسیداسیون می‌باشند بنابراین دارای پایداری کمتری هستند و در زمان قرارگیری آنها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



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

خواص الکتریکی

شکست یا ضعف الکتریکی روغن ترانس که به صورت ولتاژ شکست قابل اندازه گیری می باشد، معرف توانایی روغن برای تحمل تنش های الکتریکی است. این خاصیت بسیار جامع بوده و اندازه آن به مقدار ذرات، مقدار آب و روش آزمون بستگی دارد. معمول ترین روش استاندارد برای اندازه گیری شکست الکتریکی، IEC 156 است. در این روش، ولتاژ بین دو الکترود کروی با نرخ 2 kv/s تا 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، 30 kv می رسد. شکل ۷ میزان ولتاژ شکست انواع روغن های ترانسفورماتور را بر اساس میزان رطوبت نشان می دهد [۲۲]. از آنجاییکه شکست ولتاژ به طور چشمگیری به میزان ناخالصی های موجود در روغن ترانسفورماتور نظیر ذرات ناخالصی، رطوبت اضافی و حباب های 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

میزان آب

به طور 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 در صورت وجود آب آزاد، اگرچه گرم کردن روغن باعث تسریع در جداسازی آب می گردد 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.

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

گازهای تولید شده در اثر کارکرد روغن ترانسفورماتور

پایه گیاهی و معدنی

زمانیکه روغن در معرض جهش های الکتریکی قرار می گیرد، بعضی از مولکول های روغن که به سطح انرژی بالاتر می رسند، شکسته شده و اجزای سبک از آنها جدا می شود. اجزای جدا شده غالباً 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].

مزایا، مشکلات فنی و چالشهای تحقیقاتی

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

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

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 در دسترس بودن روغن خام گیاهی جهت تولید روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی در

مقیاس صنعتی از دیگر چالش‌ها می‌باشد.

- نقطه ریزش روغن‌های ترانسفورماتور پایه گیاهی نمی‌تواند کمتر از 30°C شود بنابراین استفاده از این روغن‌ها

در شرایط آب و هوایی سرد از دیگر چالش‌ها است [۴۱-۲۳، ۲۰، ۱۷، ۱۰].

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, °C	- 15 to -25	- 20 max.	- 50 max.
Interfacial tension (IFT), dynes/cm	25	40-45	25
Flash point °C	310-325	275 min.	300 min.
Fire point °C	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 °C	0.50-0.57	0.488	0.363
Thermal conductivity, W/mK	0.17	0.13	0.15
Coefficient of expansion/°C	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

نتیجه گیری

تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه تولید روغن های ترانسفورماتورگیاهی صورت گرفته است و مطالعات در زمینه مزایا، مشکلات فنی و چالش های این دسته از سیالات همچنان ادامه دارد. استفاده از روغن های ترانسفورماتور پایه گیاهی می تواند نقش کلیدی در کاهش اثرات زیست محیطی روغن های 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 روغن های ترانسفورماتور پایه گیاهی در سراسر جهان است؛ بنابراین توجه به توسعه و تولید این دسته از روغن های ترانسفورماتور می تواند کمک شایانی به حفظ منابع نفتی و محیط زیستی نماید.

مراجع

- [1] Sitorus, H. B. Beroual, A. Setiabudy, R. Bismo, S. "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, 1-4 (2014).
- [2] Senthil Kumar, S. Willjuice Iruthayarajan, M. Bakruthen, M. "Analysis of Vegetable Liquid Insulating Medium for Applications In High Voltage Transformers," in IEEE International Conference on Science Engineering and Management Research, Chennai, 27-29 (2014).
- [3] Sinan, S. Shawaludin, S. Jasni, J. Azis, N. Ab Kadir, M. Mohtar, M. "Investigation on the AC breakdown voltage of RBDPO Olein," in Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2014 IEEE, pp. 760-763 (2014).
- [4] Chandrasekar S. Montanari, G. "Analysis of partial discharge characteristics of natural esters as dielectric fluid for electric power apparatus applications," IEEE Trans Dielectr Electr Insul, vol. 21, 1251-1259 (2014).

- [5] Tenbohlen S. Koch, M. "Aging performance and moisture solubility of vegetable oils for power transformers," IEEE Trans Power Del, vol. 25, 825-830 (2010).
- [6] Oommen T. V. Claiborne, C. C. "Electrical transformers containing electrical insulation fluids comprising high oleic acid oil compositions," ed: Google Patents, (1999).
- [7] Cannon G. S. Honary, L. A. "Soybean based transformer oil and transmission line fluid," ed: Google Patents, (1999).
- [8] McShane, C. P. Corkran, J. L. Harthun, R. A. Gauger, G. A. Rapp, K. J. Howells, E. "Vegetable oil based dielectric coolant," ed: Google Patents, (2000).
- [9] Vishal S. Vikas, P. "Transformer's history and its insulating oil," in 5th National Conf., INDIACom, Computing For Nation Development, (2011).
- [10] Bertrand Y. Hoang, L. "Vegetal oils as substitute for mineral oils," in Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7th International Conference on, 491-494 (2003).
- [11] Oommen, T. Claiborne, C. Walsh, E. Baker, J. "Biodegradable transformer fluid from high oleic vegetable oils," in Doble Conf. Paper, (1999).
- [12] Abdelmalik, A. Fothergill, J. C. Dodd, S. J. Abbott, A. P. Harris, R. "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, 1-4 (2011).
- [13] Liao, R. Hao, J. Chen, G. Ma, Z. Yang, L. "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] Azis N. Wang, Z. "Acid generation study of natural ester," in XVII International Symposium on High Voltage Engineering, 22-26 (2011).
- [15] Lundgaard, L. Hansen, W. Ingebrigtsen, S. "Ageing of mineral oil impregnated cellulose by acid catalysis," IEEE Trans Dielectr Electr Insul, vol. 15, pp. 540-546 (2008).
- [16] Wilhelm, H. Santos, C. Stocco, G. "Dissolved gas analysis (DGA) of natural ester insulating fluids with different chemical compositions," IEEE Trans Dielectr Electr Insul, vol. 21, 1071-1078 (2014).
- [17] Oommen, T. "Vegetable oils for liquid-filled transformers," IEEE Electr Insul Mag, vol. 18, 6-11 (2002).
- [18] "OECD: Principles and strategies related to the testing of degradation of organic chemicals."

- [19] Oommen, T. Claiborne, C. Walsh, E. Baker, J. "A new vegetable oil based transformer fluid: development and verification," in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000 Annual Report Conference on, 308-312 (2000).
- [20] Divakaran, D. Kalaivanan, C. "Investigation of lightning impulse voltage characteristics and other thermo-physical characteristics of vegetable oils for power
- [21] apparatus applications," in Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 2012 IEEE 10th International Conference on the, 1-4 (2012).
- [22] Ong, J. "Biotemp, a sensible solution," ed: ABB (2013).
- [23] Martin, R. Athanassatou, H. Duart, J. C. Perrier, C. Sitar, I. Walker, J. et al., "Experiences in service with new insulating liquids," Working Group A2-35 CIGRE, 1-95 (2010).
- [24] Badent, R. Hemmer, M. Schwab, A. "Inhibited rape-seed oil as substitute for mineral oils," in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002 Annual Report Conference on, 268-271 (2002).
- [25] Hosier, I. Vaughan, A. Montjen, F. "Ageing of biodegradable oils for high voltage insulation systems," in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference on, 481-484 (2006).
- [26] Martins, M. A. G. "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, 7-13 (2010).
- [27] Martin, D. Lelekakis, N. Guo, W. Odarenko, Y. "Further studies of a vegetable-oil-filled power transformer," IEEE Electr Insul Mag, vol. 27 (2011).
- [28] Hikita, M. Tokiyoshi, J. Tsuchie, M. Kozako, M. Suzuki, T. Kanetani, A. 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, 26-29 (2012).
- [29] Pakianathan, P. S. Rajamani, M. "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, 648-652 (2013).
- [30] "Vegetable oil-filled transformers for a sustainable future," 2008.
- [31] "Vegeta-Biodegradable oil immersed transformers."
- [32] John and, G. Robert, W. "Utilities turning to vegetable oil-based transformer fluids."

- [33] Ciuriuc, A. Notingher, P. V. Jovalekic, M. Tenbohlen, S. "Experimental study on vegetable and mineral transformer oils properties," in Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2014 International Conference on, 169-174 (2014).
- [34] Xu, Y. Qian, S. Liu, Q. Wang, Z. "Oxidation stability assessment of a vegetable transformer oil under thermal aging," IEEE Trans Dielectr Electr Insul, vol. 21, 683-692 (2014).
- [35] Ciuriuc, A. Notingher, P. Setnescu, R. Dumitran, L. Setnescu, T. "Lifetime estimation of vegetable oil for transformers," in High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2014 International Conference on, 1-4 (2014).
- [36] SM, B. Robia, Y. Amir, N. "Use of natural vegetable oils as alternative dielectric transformer coolants," (2006).
- [37] Rafiq, M. Lv, Y. Z. Zhou, Y. Ma, K. B. Wang, W. Li, C. R. Wang, Q. "Use of vegetable oils as transformer oils – a review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 52, 308 -324 (2015).
- [38] 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.
- [39] Ulrych, J. Svoboda, M. Polanský, R. Pihera, J. "Dielectric analysis of vegetable and mineral oils," in Dielectric Liquids (ICDL), 2014 IEEE 18th International Conference on, 1-4 (2014).
- [40] Radhika, R. Iruthayarajan, M. W. Pakianathan, P. S. "Investigation of critical parameters of mixed insulating fluids," in Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2014 International Conference on, 357-362 (2014).
- [41] Susilo, A. Muslim, J. Arief, Y. Z. Muhamad, N. A. Hikita, M. Kozako, M. 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, 232-236 (2014).
- [42] Villarroel, R. Garcia, D. García, B. Burgos, J. "Moisture diffusion coefficients of transformer pressboard insulation impregnated with natural esters," IEEE Trans Dielectr Electr Insul, vol. 22, 581-589 (2015).

Preparation, Characterization and Properties of Magnetically Aligned Hexagonal Boron Nitride Nanosheets/Epoxy Nanocomposites

Mehdi Salehirad^{1,2}, Mir Mohammad Alavi Nikje¹, Leila Ahmadian-Alam², Maryam Kardani²

Abstract: In this study, preparation and characterization of Fe₃O₄/ boron nitride epoxy nanocomposites with enhanced thermal conductivity were investigated. Nanocomposites based on the epoxy/h-BN nanosheets were prepared in the presence of various amounts of polymer-grafted h-BN nanosheets (0-20 wt%) in order to achieve high performance nanocomposites. The magnetically responsive Fe₃O₄-grafted hBN nanosheets were prepared by surface modification of h-BN nanosheets, and their orientations were controlled by applying an external magnetic field during polymer curing. The influence of modified h-BN nanosheets on the thermal transport properties of nanocomposites were investigated. It was found that the addition of modified h-BN nanosheets resulted in a significant increase in thermal conductivity. The maximum thermal conductivity was 0.35 W/m.K at 25 °C for the magnetically aligned nanocomposite containing 20% h-BN nanosheets. The alignment of modified h-BN nanosheets was further verified by scanning electron microscopy (SEM) images.

Introduction

There has been considerable interest, driven by the long lifetime and thermal management of electronic devices, to develop new generation of electronics packaging and replace the conventional materials used in many electronic devices [1]. In recent years, polymer composites are known as one of the best candidates for packaging applications due to their low costs as well as their liveness [2]. In this case, the performances of polymer composites as electronic packaging materials is affected by their thermal conductivity, electrical insulating and coefficient of thermal expansion (CTE) properties. Recently, conventional filled polymeric materials have attracted considerable attention in the current electronic devices packaging. However, the achievement of durable polymer-based packaging that improves the thermal management, mechanical and adhesion properties needs considerable improvements.

In organic–inorganic hybrid materials approach, nano dimensional materials are used to modify polymeric packaging in order to improve their performance and make them ideal candidates for

¹ Department of Chemistry, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, P.O. Box 34148 - 96818, Qazvin, Iran. Tel-Fax: +982813780040

² Niroo Research Institute, Chemistry and Materials Division, Chemistry and Processing Group, Tehran, Iran, P.O. Box 14665/517, Tel-Fax: +982188078296

electronics packaging applications. This is achieved through induction of the continuous thermal transport pathway in polymer matrix and also improved mechanical, thermal and adhesive properties of polymers [3]. Ceramic fillers [4], carbon-based fillers [5] and so forth have been used numerously to prepare polymeric packaging as advanced thermal interface materials (TIMs) due to their high intrinsic thermal conductivity, specific surface area in combination with simple surface modification by both physical and chemical processes and also commercial availability of these fillers. Nowadays, hexagonal boron nitride (HBN) fillers have attracted attention due to their higher thermal conductivity and lower CTE compared to conventional fillers [6]. However, filler geometries [7], orientations [8], and interfacial properties [9] affect the performances of composites, regardless of the intrinsic properties of fillers. To prepare polymer composites with aligned fillers, several approaches are applied including the use of pre-aligned fillers e.g., carbon nanotube arrays [10], gravitational alignment [11], shear alignment [12] and magnetic alignment [13], respectively.

Magnetic alignment is an attractive method for this purpose due to the remote control of filler alignment and possibility of orienting filler at arbitrary directions [13]. For example attachment of superparamagnetic nanoparticles such as iron oxide onto the surface of high aspect ratio fillers such as hexagonal boron nitride as a support for magnetic nanoparticles is an effective strategy to prepare magnetically responsive HBN. This approach which is known as the hierarchical nanostructures has received considerable attention due to the good dispersion of nanoparticles into the polymer matrix, thereby enhancing thermal and mechanical properties of polymeric composites.

The present work focuses on the development of the redox polymerization to prepare modified HBN nanosheet as an effective support to attain magnetically responsive HBN. We have tried to investigate the thermal conductivity behavior of epoxy nanocomposites filled with aligned HBN nanosheets.

Experimental section

Materials

Hexagonal boron nitride (70 nm, Lower Friction), acrylamide (AM, 99% from Sigma), cerium (IV) ammonium nitrate (CAN, 99.99% from Sigma-Aldrich), sulfuric acid (98% from Aldrich), di-tert-butyl peroxide (DTBP, 95% from Sigma-Aldrich), *N*-methyl-2-pyrrolidinone (NMP, 97% from Sigma-Aldrich), Magnetic iron oxide nanoparticles (98%, APS: 20-30 nm from

Nanosany corporation), hydrogen peroxide solution (30 % (w/w) in H₂O from Sigma) and Triethylenetetramine (TETA, ≥97% from Aldrich) were used as received without further purifications.

Synthesis of hydroxyl-functionalized boron nitride nanosheets (FHBN)

Hydroxyl functionalized boron nitride nanosheets were prepared by using previously reported method [14]. Boron nitride nanosheets (0.2 g) were dispersed in NMP (20 ml) through sonication for 3 h. The supernatant was collected by centrifuge and then dried in a vacuum oven at 80 ° C. The exfoliated HBN nanosheets (0.1 g) were dispersed in 20 ml of NMP and then added to a flask containing 30 ml of DTBP. This suspension was stirred for 20 h at 120 ° C under N₂ atmosphere. After centrifuging, the *tert*-butoxy-functionalized HBN was washed with ethanol, chloroform and dried under vacuum. Afterwards, the *tert*-butoxy-functionalized HBN was dispersed in H₂SO₄ (35 ml) through sonication for 45 min. The bath experiment was run by slow addition of hydrogen peroxide solution (10 ml) and the suspension was stirred at room temperature for 2 h. After centrifuging, the hydroxyl-functionalized HBN nanosheets were washed with chloroform and water and then dried under reduced pressure at 50 °C.

Synthesis of polyacrylamide-grafted boron nitride nanosheets (mHBN)

The redox graft polymerization method was performed in a 100 ml lab reactor which was placed in an oil bath thermostated at the desired temperature. FHBN (0.4 g, dispersed in 12 ml of 1 N HNO₃ solution) was dispersed in AM monomer solution (1.2 g, 0.017 mol, dissolved in 3 ml distilled water) and then the reactor was degassed and back-filled with nitrogen gas three times and left under N₂. The bath experiment was run by adding CAN (40 mg, 0.07 mmol) and the reaction temperature was raised to 70 °C and stirred for 2 h. The obtained suspension was diluted by adding an excess of water. After centrifuging, the modified HBN nanosheets were washed with water three times and then freeze-dried for further use.

Preparation of magnetic iron oxide nanoparticles-modified boron nitride hierarchical nanostructures (FeNPs-mHBN)

The magnetic iron oxide nanoparticles modified boron nitride composite was prepared by the addition of a known amount of iron oxide nanoparticles into mHBN nanosheets. The prepared mHBN nanosheets (0.5 g dispersed in 10 ml distilled water) were stirred for 1 h. Then, iron oxide nanoparticles (0.01 g) were added to the suspension, and the mixture was sonicated for 5 h and the resulting mixture was incubated overnight and then dried by freeze-drying.

Preparation of aligned epoxy/FeNPs-mHBN nanocomposite

The desired amount of FeNPs-mHBN nanosheets was added into the epoxy resin, and the mixture was stirred for 5 h in order to disperse the nanomaterials. When the homogenization of the mixture was completed, TETA as the hardener was added and nanocomposite samples were prepared by casting into a silicon mold located between two parallel magnets overnight. Finally, all samples were post-cured at 50 and 80 °C for 1 h, respectively. The nanofiller loading in the resulting mixture was calculated as the mass percent of FeNPs-mHBN with respect to epoxy resin. For the preparation of nanocomposite samples filled with FeNPs-mHBN nanosheets, the casting mixtures had FeNPs-mHBN loadings of 5% (I), 10% (II), 15% (III) and 20% (IV). Nanocomposites samples were placed vertically between two parallel magnets, designated as M.

Characterization

Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) was done on a Bomem FTIR instrument by averaging 32 scans with a wave number resolution of 4 cm^{-1} . X-ray diffraction (XRD) patterns were collected on an X-ray diffraction instrument (Siemens D5000) with a Cu target ($\lambda=0.1540\text{ nm}$) at room temperature. The system consists of a rotating anode generator which operated at 35 kV and 20 mA. The samples were scanned from $2\theta=5$ to 100° at the step scan mode; the diffraction pattern was recorded using a scintillation counter detector. Field emission scanning electron microscopy (FESEM) (Zeiss SUPRA 35VP) equipped with an energy-dispersive X-ray system (EDX) was used to examine the morphology of HBN nanosheets. For this study, the cross cuts of the nanocomposite were prepared by breaking them under liquid nitrogen and the

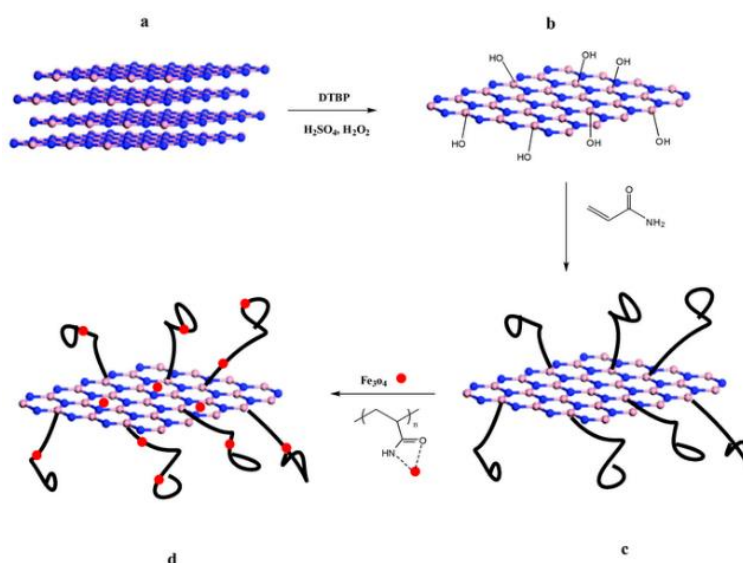
FESEM micrographs of the cross-section of the nanocomposites were taken at various magnifications. Transmission electron microscopy (TEM) was used to directly visualize HBN after post-polymerization. Bright field TEM images were recorded on a Philips EM 120 transmission electron microscope at an accelerating voltage of 150 kV. The thermal diffusivity (α) of all nanocomposites were measured by the laser flash method using a LFA 471 (Netzsch). Thermal conductivity was calculated by using the following Equation 1:

$$k = \alpha C_P \rho \quad (1)$$

Where ρ and C_P are the density and heat capacity of nanocomposite samples. The C_P was measured using differential scanning calorimetry (DSC, NETZSCH DSC 200 F3, Netzsch Co, Germany) by heating of the samples from ambient temperature to 250 °C at a heating rate of 10 °C/min.

Results and discussion

The synthetic routes of hydroxyl-functionalized HBN nanosheets (FHBN), polymer-grafted HBN nanosheets (mHBN) and iron oxide nanoparticles modified boron nitride hierarchical nanostructure (FeNPs-mHBN) are shown in scheme 1.



SCHEME 1. Structure of HBN nanosheets before and after graft polymerization of AM a) HBN, b) FHBN, c) mHBN and d) FeNPs-mHBN.

As shown in the scheme 1, the hydroxyl functional groups onto the HBN nanosheets are activated with CAN via a redox polymerization method and generated radical active sites for further modification of the HBN nanosheets. The successful preparation of FHBN and mHBN were confirmed by FTIR and TGA analysis. The FTIR spectra of HBN, FHBN and mHBN are shown in Fig. 1. The absorption peaks at 1397 and 816 cm^{-1} are attributed to in-plane B–N stretching vibration and out-of-plane bending vibration, respectively [14]. For FHBN sample, the absorption band of around 1,080 cm^{-1} can be assigned to the C–O bond. The characteristic vibration bands of the hydroxyl stretching band appeared at 3400 cm^{-1} (Fig. 1), indicating that grafted-*tert*-butoxy groups onto the surface of HBN nanosheets have been successfully converted to hydroxyl groups [14]. The characteristic bands of the polyacrylamide can be observed in FTIR spectrum of the polymer-grafted HBN nanosheets (Fig. 1). For HBN/PAM hybrid nanosheets (mHBN in Fig. 1), the carbonyl stretching band at around 1,657 cm^{-1} has overlapped with the B–N bands of HBN nanosheets. The characteristic band at around 3,420 cm^{-1} can be assigned to the NH band [15]. The aliphatic C–H bands have appeared at about 2,850–2,930 cm^{-1} [15]. Consequently, the FTIR spectra showed that the PAM polymer has been successfully grafted onto the surface of the HBN nanosheets.

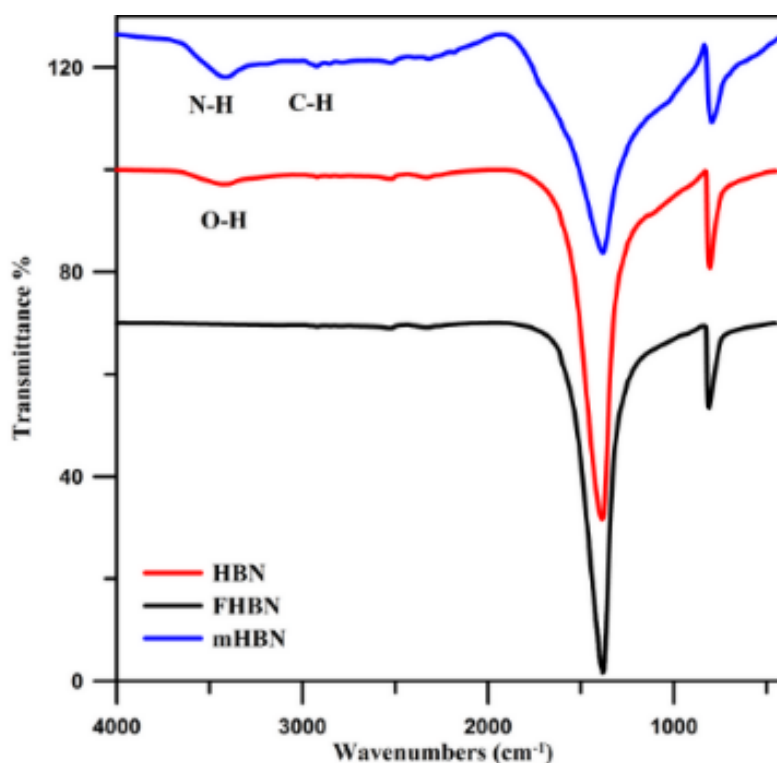


FIGURE 1. FTIR Spectra of HBN and modified HBN nanosheets.

TEM micrographs of HBN and FeNPs-mHBN nanosheets are shown in Fig. 2. The successful immobilization of iron oxide nanoparticles onto the mHBN surface was confirmed by TEM images (Fig. 2a1 and 2a2). TEM was also used to detect the level of the iron oxide nanoparticles dispersion on the mHBN surface and the size of immobilized iron oxide nanoparticles. TEM characterization showed the spherical iron oxide nanoparticles with a diameter range of 1–10 nm and a quite uniform size distribution. Additionally, relatively homogeneous distribution of the iron oxide nanoparticles on the mHBN surface was observed. The branched network morphology observed for FeNPs-mHBN nanosheets results from agglomeration of HBN nanosheets, which may indicate that the van der Waals interparticle interactions exist between the HBN nanosheets. TEM images indicate that several HBN nanosheets form a core with PAM shell existing around the HBN nanosheets (Fig. 2b), presumably due to the aggregations of HBN nanosheets caused by the van der Waals interparticle or interparticle termination [16]. The presence of carbon, oxygen, iron elements in mHBN and FeNPs-mHBN samples were also detected and confirmed by EDX analysis. The amount of the immobilized iron oxide nanoparticles onto the mHBN nanosheets was determined by EDX analysis to be 1.9 Wt%.

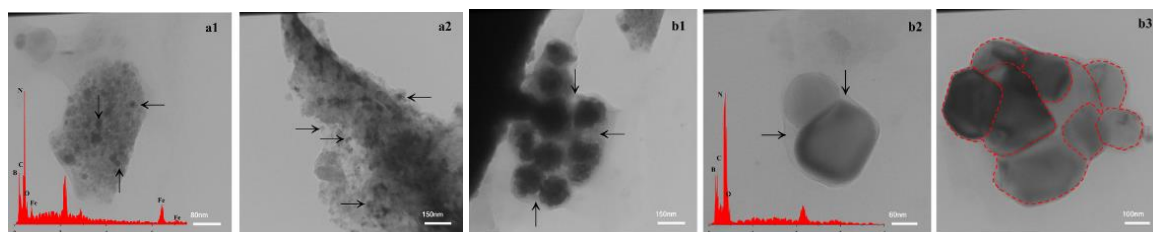


FIGURE 2. TEM micrographs and EDX spectra of mHBN and FeNPs-mHBN nanosheets.

The FeNPs-mHBN composite as a high thermal conductivity material was used in order to improve the thermal conductivity of epoxy nanocomposites. It is expected that magnetically responsive HBN (FeNPs-mHBN) can respond to the external magnetic field. The aligned epoxy nanocomposite samples with different loading of FeNPs-mHBN were prepared by applying a vertical magnetic field. In the following discussion, we will focus on thermal conductivity behavior of prepared epoxy nanocomposites.

The alignment of the HBN nanosheets has a fundamental role in the transport of heat across polymer matrix and its conductivity behavior. Thus, the filler alignment in prepared epoxy nanocomposites was monitored by SEM images (Fig. 3). SEM Images of epoxy nanocomposites with different loading of HBN nanosheets reveal distinct HBN nanosheets in

cross section of all nanocomposites. In addition, relatively homogeneous distribution of HBN nanosheets throughout the nanocomposite matrix is also observed. Moreover, the SEM micrographs of all nanocomposites show the existence of horizontally and vertically oriented platelets that are projected as 1D rods (red arrows) and 2D plates (blue arrows), respectively (Fig. 3). We observed that effective alignment of HBN nanosheets in polymer matrix was decreased by increasing HBN nanosheets loading. This was due to high viscosity and a decrease of the free volume of HBN plates in epoxy resin, which inhibits the free orientation of HBN nanosheets in epoxy resin. Overall, when nanofiller loading is decreased the role of magnetic alignment for orientating of HBN nanosheets in polymer matrix is more prominent.

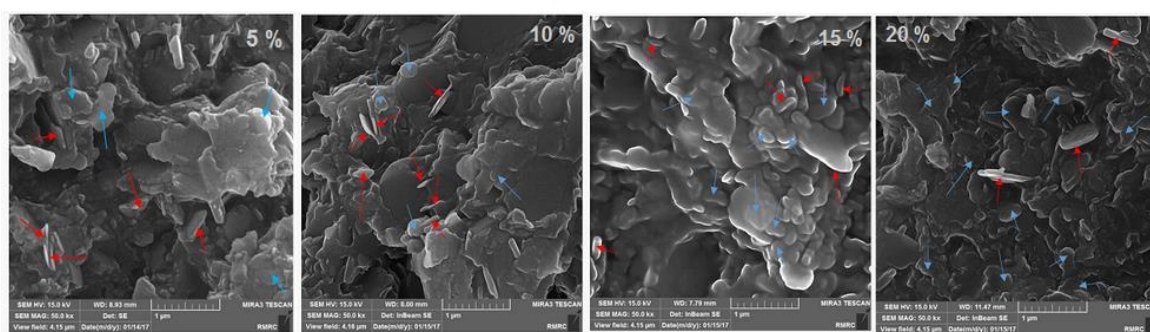


FIGURE 3. SEM cross-section images of the epoxy/HBN nanocomposite placed between two parallel magnets in a) vertical position and b) horizontal position.

From LFA data (Table 1), the thermal conductivity of neat epoxy and its nanocomposites is calculated by Eq. 1. The thermal conductivity of epoxy-based sample at room temperature increases by the addition of HBN nanosheets. The enhancement of thermal conductivity in nanocomposite samples has been mainly attributed to high intrinsic thermal conductivity of the HBN nanosheets. It is expected that alignment of HBN nanosheets as thermal transport materials can provide the continuous thermal transport pathway in polymer matrix and improve the heat transport at low HBN loading.

These results can be attributed to the filler alignment and its important role in the transport of heat across polymer matrix. Nanocomposite containing 20 % HBN nanosheets (MII) showed higher thermal conductivity and 1.58 times enhancement of thermal conductivity in comparison with the other nanocomposites.

TABLE. Thermal conductivity of the epoxy/HBN nanocomposites.

Designation	HBN loading (wt%)	Thermal Conductivity (W/mk)	Thermal Enhancement ($K_{\text{Nanocomposite}}/K_{\text{Epoxy}}$)
M	---	0.2208	---
MI	5	0.2281	1.03
MII	10	0.3371	1.52
MIII	15	0.3173	1.43
MIV	20	0.35	1.58

Conclusion

We modified BNNs by grafting through redox polymerization of acrylamide from hydroxyl groups of already modified BNNs as a macro-monomer. FT-IR, TEM and EDX results confirm the successful grafting of polyacrylamide and also the attachment of iron oxide nanoparticles onto the surface of hBN nanosheets. The prepared nanocomposites showed high thermal conductivity and significant mechanical properties in comparison with the pristine epoxy composite. The nanocomposite containing 20 % BNNs showed high thermal conductivity (0.35 W/mK at 25 °C) and desired properties compared with the other nanocomposites. We conclude that epoxy/boron nitride nanocomposites can be potentially used as a thermal transport materials for a wide range of microelectronic applications.

References

1. Lu, D. Wong, C. P. Materials for Advanced Packaging (Springer, New York, 2009).
2. Lin, Z. Liu, Y. Raghavan, S. Moon, K. Sitaraman, S. K. Wong, C. ACS Appl. Mater. Interfaces **5**, 7633-7640 (2013).
3. Zeng, X. Yu, S. Ye, L. Li, M Pan, Z. Sun, R. Xu, J. J. Mater. Chem. C **3**, 187-195 (2015).
4. Song, W. L. Wang, P. Cao, L. Anderson, A. Mezziani, M. J. Farr, A. J. Sun, Y. P. Angew. Chem. Int. Ed. **51**, 6498-6501 (2012).

5. Gu, J. Yang, X. Lv, Z. Li, N. Liang C. Zhang, Q. Int. J Heat Mass Transf. **92**, 15-22 (2016).
6. Yuan, C. Li, B. D. L. Xie, B. M. Huang, Luo, X. ACS Appl. Mater. Interfaces **23**, 13000-13006 (2015).
7. Su, J. Xiao.Y. Ren, M. Phys. Status. Solidi. A **210**, 2699-2705 (2013).
8. Song, W.L. Wang, P. Cao, L. Anderson, A. Meziani, M. J. Farr, A.J. Sun, Y.P. Angew. Chem. Int. Ed. **51**, 6498-6501 (2012).
9. Sato, K. Horibe, H. Shirai, T. Hotta, Y. Nakano, Nagai, H. H. Mitsuishi, K. Watari, K. J. Mater. Chem. **20**, 2749-2752 (2010).
10. Marconnett, A. M. Yamamoto, N. Panzer, M.A. Wardle B. L. Goodson, K. E. ACS Nano **5**, 4818-4825 (2011).
11. Yousefi, N. Gudarzi, M. M. Zheng, Q.B. Aboutalebi, S. H. Sharif, F. Kim, J. K. J. Mater. Chem. **22**, 12709-12717 (2012).
12. Kuang, Z. Chen, Y. Lu, Y. Liu, L. Hu, S. Wen, S. Mao Y. Zhang, L. Small **11**, 1655-1659 (2015).
13. Erb, R. M. Libanori, R. Rothfuchs, N. Studart, A. R. Science **335**, 199-204 (2012).
14. Sainsbury, T. Satti, A. May, P. Wang, Z. McGovern, I. Gun'ko Y. K. Coleman, J. J. Am. Chem. Soc. **134**, 18758-18771 (2012).
15. Rahman, N. Haseen, U. RSC Adv. **5**, 7311-7323 (2015).
16. Sarac, A. S. Prog. Polym. Sci. **24** 1149-1204 (1999).

معرفی آزمایشگاه مرجع رنگ و پوشش

NRI
Niroy Research Institute

پژوهشگاه نیرو

آزمایشگاه مرجع رنگ و پوشش



آدرس: تهران - شهرک قدس - انتهای بلوار شهید
دادمان - پژوهشگاه نیرو
تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۰-۴
فاکس: ۸۸۰۷۸۲۹۶

Email : analabs@nri.ac.ir
Web: <http://www.nri.ac.ir>

Chemistry & Materials

www.nri.ac.ir

معرفی آزمایشگاه مرجع رنگ و پوشش



معرفی آزمایشگاه:

آزمایشگاه مرجع رنگ و پوشش پژوهشگاه که در حال حاضر بعنوان آزمایشگاه مرجع وزارت نیرو شناخته شده است توجه به اهمیت رنگ و پوشش در حفاظت تجهیزات و تأسیسات صنایع مختلف بالاخص صنعت برق تأسیس گردیده است وهدف افزایش سطح رضایت مشتریان خود از طریق ارائه خدمات آزمایشگاهی با کیفیت را سر لوجه عملکرد خود قرار داده است ودر راستای هدف مذکور تا کنون موفق به استقرار سیستم مدیریت کیفیت استاندارد بین المللی ISO/IEC 17025 از شرکت DAP آلمان در دوره گردیده است و در حال حاضر در صدد استقرار سیستم های کیفیت از سایر شرکت های معتبر است . این آزمایشگاه بنا به ضرورت واهمیت آزمونهای رنگ و پوشش در استانداردهای بین المللی و ملی ، تجهیزات مورد نیاز برای انجام انواع آزمایشهای مربوط به رنگ و پوشش را دارا می باشد و با توجه به وجود کارشناسان مجرب و تجربیات طولانی کلیه خدمات آزمایشگاهی ومشاوره ای را در رابطه با رنگ و پوشش انجام می دهد .

گواهینامه تأیید صلاحیت :

– موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران

آزمایشهای قابل انجام:

در این آزمایشگاه آزمایشهای لازم به منظور کنترل کیفیت انواع رنگهای محیط های صنعتی، دریایی، شیمیایی، ترافیکی و ... مطابق استانداردهای بین المللی (ISO, BS, DIN, ASTM) و استانداردهای ملی ایران و ... انجام می گیرد. این آزمایشها بشرح زیر می باشد:

الف) آزمایشهای تعیین مشخصه های فیزیکی رنگ (رنگ تر):

- | | |
|------------------------------|---|
| 1-Appearance | ۱- آزمایش سلامت ظاهری رنگ (پوسته شدن، یکنواختی) |
| 2- Settling | ۲- آزمایش تعیین درجه ته نشینی |
| 3-Fineness | ۳- آزمایش تعیین دانه بندی |
| 4- Hiding power | ۴- آزمایش تعیین قدرت پوشش |
| 5-Theoretical Spreading rate | ۵- آزمایش تعیین قدرت گسترش رنگ |
| 6- Viscosity By Ford Cup | ۶- آزمایش تعیین ویسکوزیته با فوردکاپ (واحد ثانیه) |

آدرس: تهران – شهرک قدس – انتهای بلوار
شهید دامن – پژوهشگاه نیرو
تلفن: ۰۲۱-۷۸۲۰۰۰۴ تا ۷۸۲۹۶
Email : enlabs@nri.ac.ir
Web: <http://www.nri.ac.ir>

معرفی آزمایشگاه مرجع رنگ و پوشش

NRI
Niroo Research Institute

Chemistry & Materials

www.nri.ac.ir

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 7- Viscosity By Stormer
Viscometer | ۷-آزمایش تعیین ویسکوزیته با ویسکومتر استورمر (واحد کرب) |
| 8- Viscosity | ۸-آزمایش تعیین ویسکوزیته (واحدهای mPa.s و cP) |
| 9-Density | ۹-آزمایش تعیین دانسیته |
| 10- Solid volume | ۱۰-آزمایش تعیین درصد حجمی مواد جامد |
| 11-Solid weight | ۱۱-آزمایش تعیین درصدوزنی مواد جامد |
| 12-Pot life | ۱۲-آزمایش تعیین عمر مفید مخلوط رنگ |
| 13-Wet film thickness | ۱۳-آزمایش تعیین ضخامت فیلم تر |
| 14-Flash point | ۱۴-آزمایش تعیین نقطه اشتعال |

ب) آزمایشهای تعیین مشخصه‌های فیزیکی رنگ (فیلم خشک):

- | | |
|-----------------------|---------------------------------|
| 1-Drying time | ۱-آزمایش تعیین زمان خشک شدن رنگ |
| 2- Gloss | ۲-تعیین براقیت |
| 3-Ral | ۳-تعیین رال رنگ |
| 4- Dry film thickness | ۴-تعیین ضخامت فیلم خشک رنگ |

ج) آزمایشهای تعیین خواص مکانیکی رنگ:

- | | |
|----------------|--|
| 1- Adhesion | ۱-آزمایش تعیین مقاومت به چسبندگی به روشهای کراس کات و Pull off |
| 2-Impact | ۲-آزمایش تعیین مقاومت به ضربه |
| 3- Abrasion | ۳-آزمایش تعیین مقاومت به سایش |
| 4- Washability | ۴-آزمایش تعیین مقاومت شویشی |
| 5-Cupping | ۵-آزمایش تعیین مقاومت به جامی شدن |
| 6-Bending | ۶-آزمایش تعیین مقاومت به خمش |
| 7-Hardness | ۷-آزمایش تعیین مقاومت به سختی به روش پاندولی پرسوز و کونیک |

آدرس: تهران - شهرک قدس - انتهای بلوار شهید
دادمان - پژوهشگاه نیرو
تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۷۹۴۰۰ فاکس: ۰۲۱-۸۸۰۷۸۲۹۶

Email : cnrlabs@nri.ac.ir
Web: <http://www.nri.ac.ir>

معرفی آزمایشگاه مرجع رنگ و پوشش



۸- آزمایش تعیین مقاومت به سختی به روش مدادی 8- Pencil Hardness

د) آزمایشهای شیمیایی و محیطی رنگها و سایر پوششها

- ۱- آزمایش تعیین مقاومت در محیط مرطوب با دستگاه Humidotherm
- ۲- آزمایش تعیین مقاومت در محیط مه نمکی با دستگاه Salt spray
- ۳- آزمایش تعیین مقاومت در مقابل مواد و حلالهای شیمیایی به روش غوطه‌وری
- ۴- آزمایش تعیین مقاومت در مقابل تابش UV با دستگاه Solar box
- ۵- آزمایش تعیین مقاومت حرارتی
- ۶- آزمایش تعیین مقاومت در محیط خورنده SO_2 با دستگاه Kesternich test chamber

سایر خدمات قابل انجام:

آزمایشگاه رنگ و پوشش مرکز شیمی و مواد پژوهشگاه نیرو با در اختیار داشتن تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی و دانش فنی و تجربیات طولانی توانایی ارائه خدمات زیر را دارا می‌باشد:

- ۱- ارزیابی کارشناسی انواع رنگهای صنعتی، ترافیکی، دریایی و نسوز
- ۲- تعیین و انتخاب رنگها و پوشش‌های مناسب جهت کاربردهای مختلف
- ۳- ارائه دوره‌های آموزشی در زمینه آزمایشهای رنگها و پوششها
- ۴- مشاوره جهت کالیبراسیون تجهیزات و سیستمهای آزمایشگاهی و صنعتی مربوط به رنگ و پوشش

آدرس: تهران- شهرک قدس- انتهای بلوار شهید
دادمان- پژوهشگاه نیرو
تلفن: ۴-۸۸۰۷۹۴۰
فاکس: ۸۸۰۷۸۲۹۶

Email : enlabs@nri.ac.ir
Web: <http://www.nri.ac.ir>