



فصلنامه علمی
سال یازدهم شماره ۲، شماره پیاپی ۴۲ تابستان ۱۴۰۵
Vol. 11, No. 2 Issue No. 42
Summer 2026, Quarterly
صفحه ۵۱۱

Iran Polymer Technology;
Research and Development

واژه‌های کلیدی:

رزورسینول-فرمالدهید،
چسب،
تایر،
پوشش ضد خوردگی،
آثروژل.

مروری بر کاربردهای صنعتی رزورسینول- فرمالدهید: از چسب‌های سردپخت تایر تا پوشش‌های ضد خوردگی و چسب‌های مقاوم به آب

محمد خلیلی ماهانی*

کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی شیمی

چکیده ...

رزین رزورسینول-فرمالدهید (RF) به دلیل واکنش پذیری بالا، پخت در دمای محیط و چسبندگی خوب، نقش محوری در صنایع گوناگون دارد. این مقاله مروری، پیشرفت‌های اخیر در کاربردهای صنعتی RF را بررسی می‌کند. در صنعت تایر، سامانه چسب RFL همچنان استاندارد است، اما جایگزین‌های غیرسمی مانند رزین‌های آرامینولیک تا ۳۰/۸ درصد بهبود چسبندگی را نشان داده‌اند. در صنعت چوب، چسب‌های تانن-رزورسینول-فرمالدهید (TRF) در ساخت الوارهای متقاطع-چندلایه عملکرد مکانیکی مناسب برای کاربردهای سازه‌ای دارند. پوشش‌های کامپوزیتی اپوکسی/RF، مقاومت به خوردگی را تا بیش از دو مرتبه بزرگی نسبت به اپوکسی خالص افزایش می‌دهند. همچنین نانوکوره‌های توخالی مزوپور RF با بارگذاری مهارکننده‌های خوردگی، محافظت هوشمندی را فراهم می‌کنند. در حوزه مواد پیشرفته، آثروژل‌ها و کربن آثروژل‌های حاصل از RF با سطح ویژه تا ۳۶۰۰ متر مربع بر گرم و رسانندگی حرارتی تا ۰/۰۲۳ وات بر متر-کلوین، کاربردهای گسترده در عایق‌های حرارتی، ذخیره‌سازی هیدروژن و ابرخازن‌ها یافته‌اند. با وجود چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از سمیت مواد اولیه، نرخ رشد مرکب سالانه بازار RF حدود ۴ تا ۷/۵ درصد پیش‌بینی می‌شود که ناشی از تقاضا در خودروسازی و ساختمان است. این مرور نشان می‌دهد که RF با وجود رقابت جایگزین‌های سبز، به دلیل خواص منحصربه‌فرد خود همچنان ماده‌ی مهمی باقی مانده است.

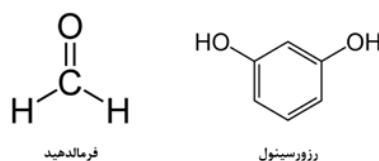
*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

khalilimahani80@gmail.com

۱ مقدمه

رزین رزورسینول-فرمالدهید (RF) یکی از مهم‌ترین پلیمرهای تراکمی گرماسخت است که از واکنش تراکمی رزورسینول ($C_6H_4(OH)_2$) و فرمالدهید (CH_2O) در حضور کاتالیزورهای قلیایی (مانند $NaHCO_3$ ، $NaOH$ یا Na_2CO_3) یا محیط اسیدی به دست می‌آید (شکل ۱). هسته آروماتیک رزورسینول که دارای دو گروه هیدروکسیل است، واکنش‌پذیری فوق‌العاده بالایی نسبت به فنل معمولی به آن می‌بخشد. در سازوکار سنتز این رزین، دو واکنش اصلی رخ می‌دهد: (الف) تشکیل مشتقات متیلول (هیدروکسی متیل) رزورسینول در اثر حمله الکترون‌دوست فرمالدهید به حلقه آروماتیک، و (ب) تراکم این مشتقات متیلول با یکدیگر برای ایجاد پل‌های متیلن و متیلن‌اتر که در نهایت به تشکیل شبکه سه‌بعدی پلیمری منجر می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که تغییر در نسبت مولی واکنش‌دهنده‌ها، نوع کاتالیزور و pH محیط می‌تواند به‌طور چشمگیری بر زمان ژل شدن، چگالی ظاهری و ریزساختار نهایی رزین تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، استفاده از Na_2CO_3 با قدرت قطبش بالا موجب تشکیل پیش‌ماده‌هایی با تخلخل کمتر و مقاومت مکانیکی بهتر (استحکام خمشی ۲۱/۲ مگاپاسکال و استحکام فشاری ۵۲/۲ مگاپاسکال) می‌شود. همچنین، نسبت رزورسینول به کاتالیزور (R/C) که معمولاً در محدوده ۵۰ تا ۳۰۰ متغیر است، نقش تعیین‌کننده‌ای در اندازه حفرات نهایی و مورفولوژی ژل دارد [۱ و ۲].

خواص حرارتی و پایداری شیمیایی رزین RF آن را از بسیاری از رزین‌های فنولیک معمولی متمایز می‌سازد. مطالعات ترموگراویمتری (TGA) و کالریمتری روبشی تفاضلی (DSC) نشان داده‌اند که اصلاح رزین RF با منابع حاوی بور مانند فیل‌بورونیک اسید (PBA) می‌تواند پایداری حرارتی آن را افزایش دهد، به گونه‌ای که رزین حاوی ۶ درصد وزنی PBA بیشترین بازده حرارتی را از خود نشان می‌دهد و روش پخت ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت به عنوان بهینه‌ترین روش از نظر صرفه‌جویی انرژی معرفی شده است [۳]. کربن‌زایی (Carbonization) آئروژل‌های RF در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در اتمسفر گازی حاوی ۹۵ درصد نیتروژن و ۵



شکل ۱ طرح‌واره‌ی مولکول رزورسینول و فرمالدهید.

درصد هیدروژن، آئروژل کربنی با سطح ویژه بالای ۷۷۹/۲۲ متر مربع بر گرم و محدوده عملکرد حرارتی بیش از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌کند که پایداری حرارتی بسیار بالاتری نسبت به آئروژل RF اولیه دارد. افزون بر این، زمان سوختن آئروژل کربنی نسبت به آئروژل RF دو برابر شده و رسانندگی گرمایی آن به ۵۳ میلی‌وات بر متر-کلوین می‌رسد، که این ماده را به یک عایق حرارتی کارآمد در دماهای بالا تبدیل می‌کند [۴]. با وجود خواص استثنایی، رزین RF با چالش‌های جدی زیست‌محیطی مواجه است. رزورسینول به عنوان ماده مختل‌کننده غدد درون‌ریز دسته ۱ و فرمالدهید به عنوان ماده سرطان‌زای دسته ۱ طبقه‌بندی می‌شوند که در قوانین اروپا محدودیت‌های شدیدی برای آن‌ها وضع شده است [۵]. در پاسخ، تحقیقات گسترده‌ای بر روی کاهش یا حذف این مواد متمرکز شده است. یکی از رویکردها، جایگزینی جزئی رزورسینول با تانن طبیعی است که می‌تواند مصرف فرمالدهید را تا ۳۳ درصد کاهش دهد [۶]. رویکرد دیگر، استفاده از رزین‌های آرامینولیک (مانند فناوری ResiCare شرکت میشلن) است که کاملاً عاری از رزورسینول و فرمالدهید بوده و در عین حال عملکرد چسبندگی مشابه دارد. همچنین اصلاح رزین RF با نانوذرات (نانونقره، نانورس، نانولوله‌های کربنی) خواص ضدباکتریایی، مکانیکی و الکتریکی آن را بهبود می‌بخشد [۷]. به طور کلی، کاربردهای صنعتی رزین RF در چند حوزه اصلی خلاصه می‌شود: (الف) صنعت تایلر به عنوان جزئی از سامانه چسب RFL برای اتصال طناب‌های نساجی و فلزی به لاستیک [۸]، (ب) صنعت چوب و ساختمان به عنوان چسب مقاوم به رطوبت در الوارهای متقاطع-چندلایه (Cross-Laminated Timber) و تخته‌های چندلایه دریایی، (ج) پوشش‌های ضدخوردگی و ضد زیست‌رسوب به ویژه در ترکیب با رزین اپوکسی [۹]، (د) پیش‌ماده برای سنتز آئروژل‌ها و کربن آئروژل‌ها در کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی و عایق‌های حرارتی [۱۰] و (ه) نانوکره‌های توخالی برای رهایش کنترل‌شده مهارکننده‌های خوردگی یا داروها. بازار جهانی رزین RF در سال ۲۰۲۵ حدود ۱/۲ میلیارد دلار برآورد شده و پیش‌بینی می‌شود با نرخ رشد مرکب سالانه ۴/۱ تا ۷/۵ درصد تا سال ۲۰۳۴ به ۲/۵ میلیارد دلار برسد که ناشی از تقاضای فزاینده در خودروسازی (به ویژه خودروهای الکتریکی) و ساختمان‌های بلندمرتبه چوبی است [۱۱ و ۱۲].

هدف اصلی این مقاله مروری، بررسی جامع پیشرفت‌های اخیر در زمینه کاربردهای صنعتی رزین رزورسینول-فرمالدهید است. در این مقاله به بررسی کمی داده‌های عددی حاصل از تحقیقات معتبر جهانی در حوزه‌های مختلف از جمله صنعت تایلر

محیط زیست مبتنی بر رزین اپوکسی را به عنوان جایگزینی کامل برای سامانه RFL معرفی کرد. نتایج نشان داد که قدرت لایه لایه شونده گی (Peel Strength) کامپوزیت لاستیک / PET اصلاح شده با پوشش جدید، به ۱۴ نیوتن بر میلی متر می رسد که نسبت به نمونه شاهد اصلاح شده با RFL (با قدرت ۱۰/۷ نیوتن بر میلی متر) افزایش ۳۰/۸ درصدی را نشان می دهد. این نتایج نشان می دهد که جایگزینی کامل سامانه RF نه تنها امکان پذیر است، بلکه می تواند منجر به بهبود عملکرد نیز شود [۱۶].

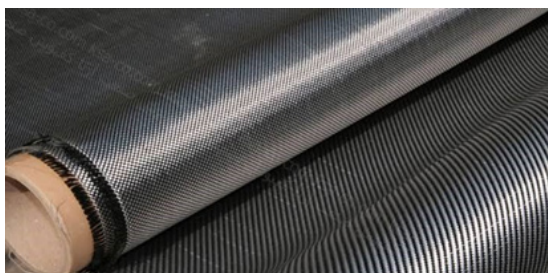
۳ کاربردها در صنعت چسب و فرآورده های چوبی

رزین RF و مشتقات آن مانند رزین فل-رزورسینول-فرمالدهید (PRF) به دلیل مقاومت استثنایی در برابر آب و هوازدگی، به طور گسترده در ساخت الوارهای متقاطع-چندلایه، تخته های چندلایه دریایی (Marine Plywood) و سازه های باربر چوبی استفاده می شوند. این چسب ها در دمای محیط عمل آوری می شوند و اتصالاتی با مقاومت بالا ایجاد می کنند [۱۷].

در یک مطالعه در سال ۲۰۲۳، عملکرد CLT شش لایه ساخته شده از گونه های چوبی با رشد سریع با استفاده از چسب تانن-رزورسینول-فرمالدهید ارزیابی شد. نتایج نشان داد که این CLT ها از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی (مانند مدول گسیختگی MOR و مدول کشسانی MOE) برای کاربردهای سازه ای مناسب هستند. انتظار می رود بازار رزین RF در صنعت ساختمان با رشد روزافزون استفاده از چوب در سازه های بلند و پایدار، همراه باشد [۱۸].

۴ پوشش های ضد خوردگی و زیست دوست

خواص شیمیایی و فیزیکی رزین RF، آن را به ماده ماتریس ایده آل برای پوشش های ضد خوردگی تبدیل کرده است (شکل ۲). مطالعات اخیر نشان داده اند که ترکیب رزین RF با رزین اپوکسی منجر به ایجاد پوششی با عملکرد عالی در برابر خوردگی و رسوب زیستی (Biofouling) می شود [۱۹].



شکل ۲ پوشش ضد خوردگی RF.

(سامانه RFL)، صنعت چسب و فرآورده های چوبی (چسب PRF)، پوشش های ضد خوردگی و ضد زیست رسوب، و همچنین کاربردهای پیشرفته در سنتز آئروژل ها، کربن آئروژل ها و نانوکوره های مزوپور پرداخته خواهد شد. علاوه بر این، چالش های زیست محیطی مرتبط با سمیت مواد اولیه و تلاش های جهانی برای توسعه جایگزین های زیستی-پایه و کم فرمالدهید و همچنین تحلیل روندهای بازار و چشم انداز آینده این رزین راهبردی در صنایع خودروسازی، ساختمان و مواد پیشرفته مورد بحث قرار خواهد گرفت. با گردآوری و تحلیل داده های عددی از منابع معتبر علمی و گزارش های بازار منتشر شده، این مقاله مروری تلاش می کند تصویری دقیق، به روز و قابل استناد از جایگاه کنونی و مسیر پیش روی رزین RF در صنعت ارائه دهد.

۲ کاربردها در صنعت لاستیک و تایر

۲-۱ نقش رزین RF در سامانه چسب RFL

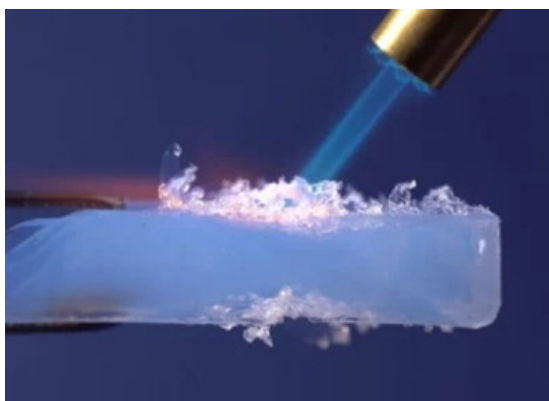
اساسی ترین کاربرد رزین RF در صنعت تایر، به عنوان جزئی از چسب RFL است. در این سامانه، رزین RF به عنوان چسب اولیه عمل کرده و همراه با لاتکس (معمولاً کوپلیمر وینیل پیریدین-استایرن-بوتادین، VP-SBR) لایه چسبنده روی طناب های تایر (نایلون، پلی استر، کولار و...) ایجاد می کند. تحقیقات نشان داده است که عملیات سطحی الیاف کولار با پیش پلیمر RF و لاتکس می تواند نیروی چسبندگی بین الیاف و لاستیک را تا ۴۰ درصد افزایش دهد [۱۳].

۲-۲ چالش های زیست محیطی و ظهور جایگزین ها

مقررات سختگیرانه زیست محیطی صنعت تایر را به سمت کاهش مصرف رزورسینول و فرمالدهید سوق داده است. در پاسخ به این چالش، شرکت میشلن (Michelin) فناوری جایگزینی به نام ResiCare را توسعه داده است. این فناوری که بر پایه رزین های فنولیک نووالاک (آرامینولیک) است، تمام سمیت ناشی از فرمالدهید و رزورسینول را حذف می کند و در عین حال عملکرد چسبندگی مشابه با نسل قدیمی (و گاهی کمی بهتر) را ارائه می دهد. تا سال ۲۰۲۵، بیش از ۱۰۰ میلیون تایر با استفاده از این رزین زیستی-پایه تولید شده است و قیمت اضافی آن برای هر تایر تنها ۴ سنت یورو (تقریباً ۴ سنت آمریکا) گزارش شده است [۱۴ و ۱۵].

۲-۳ داده های کمی عملکرد چسب RF

مطالعه ای در سال ۲۰۲۴ سامانه پوشش دهی دوستاندار



شکل ۳ آئروژل عایق حرارتی.

پلیمرشدن درجای رزورسینول، فرمالدهید و APTES پرداخت. آئروژل‌های حاصل دارای چگالی کم (تا ۰/۱۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، رسانندگی حرارتی پایین (تا ۰/۰۲۳۰ وات بر متر-کلین) و خواص مکانیکی بهبودیافته بودند که آن‌ها را به‌عنوان عایق‌های حرارتی کارآمد معرفی می‌کند (شکل ۳) [۲۲].

۵-۲ کربن آئروژل‌ها برای ذخیره‌سازی هیدروژن و ابرخازن‌ها

کربن آئروژل‌های حاصل از کربن‌دارکردن آئروژل‌های RF به‌دلیل سطح ویژه بالا، گزینه‌های بسیار مناسبی برای ذخیره‌سازی گاز هیدروژن و الکترودهای ابرخازن‌ها هستند. نتایج تحقیقی در سال ۲۰۲۴ نشان داد که فعال‌سازی فیزیکی آئروژل کربنی حاصل از RF، سطح ویژه آن را به ۷۹۹/۶۸ متر مربع بر گرم افزایش می‌دهد. تیم تحقیقاتی دیگر با استفاده از یک روش سنتز سبزتر با حلال آلی (Isopropyl Alcohol) و فعال‌سازی فیزیکی با CO_2 ، موفق به دستیابی به سطح ویژه‌ای بین ۲۳۰۰ تا ۳۶۰۰ متر مربع بر گرم شدند [۲۳]. در ادامه خلاصه کاربردهای صنعتی رزین رزورسینول فرمالدهید در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ کاربردهای صنعتی RF.

کاربرد اصلی	عملکرد	چالش
صنعت تایر	افزایش چسبندگی طناب‌های نساجی به کشسانی	جایگزین زیستی ResiCare
صنعت چوب و پوشش‌های ضدخوردگی	چسب PRF برای الوارهای CLT / کامپوزیت RF + اپوکسی	پوشش حاوی نانوکوره‌های توخالی RF
آئروژل‌ها	عایق حرارتی / ذخیره‌سازی هیدروژن و ابرخازن	سمیت مواد اولیه

۴-۱ عملکرد ضدخوردگی

مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۵ نشان داد که پوشش کامپوزیتی RF/EP-6 (حاوی نسبت خاصی از رزین RF) دارای شعاع امپدانس (معیاری مهم در طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی) برابر با $1/56 \times 10^9 \Omega \cdot cm^2$ است که بیش از دو مرتبه بزرگتر از شعاع امپدانس پوشش اپوکسی خالص یعنی $3/64 \times 10^6 \Omega \cdot cm^2$ است. این تفاوت فاحش نشان‌دهنده مقاومت بسیار بالاتر پوشش حاوی RF در برابر خوردگی است [۲۰].

۴-۲ نانوذرات توخالی RF برای رهایش مهارکننده‌های خوردگی

در رویکردی نوآورانه دیگر، محققان نانوکوره‌های توخالی مزوپور رزورسینول-فرمالدهید (MRFH) را سنتز کرده و آن را با ۸-هیدروکسی کوئینولین (8-HQ) به‌عنوان مهارکننده خوردگی بارگذاری کردند. افزودن ۴ درصد وزنی از این نانوذرات به پوشش اپوکسی، عملکرد ضدخوردگی آن را به‌طور چشمگیری افزایش داد. سازوکار این عملکرد شامل رهایش کنترل‌شده از نانوذرات و تشکیل لایه‌ی بازدارنده متراکم بر روی سطح آلیاژ آلومینیوم است که از خوردگی آن جلوگیری می‌کند [۲۱].

۵ آئروژل‌ها و کربن ژل‌های پیشرفته

واکنش تراکمی رزورسینول و فرمالدهید در شرایط سل-ژل (Sol-Gel) یکی از روش‌های استاندارد برای سنتز آئروژل‌های آلی و در نتیجه، کربن آئروژل‌ها است. این مواد به‌دلیل سطح ویژه بسیار بالا و تخلخل کنترل‌پذیر، در زمینه‌های جداسازی، کاتالیزور و ذخیره‌سازی انرژی کاربرد دارند.

۵-۱ آئروژل‌های عایق حرارتی

مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ به سنتز کامپوزیت‌های آئروژل سیلیکای تقویت‌شده با فنول (Resorcinol-Aerogel) با استفاده از

۶ چالش‌های زیست‌محیطی و ایمنی

با وجود کاربردهای گسترده، ماهیت سمی مواد اولیه رزین RF، چالشی اساسی برای صنعت است. مقررات دولتی در اروپا و آمریکای شمالی، کاهش انتشار فرمالدهید را در محصولات مصرفی الزامی کرده‌اند. در پاسخ به این چالش‌ها، تحقیقات گسترده‌ای بر روی جایگزین‌های زیستی-پایه، مانند رزین‌های مبتنی بر لیگنین و تانن، متمرکز شده است. همچنین، مطالعه سم‌شناسی در سال ۲۰۲۴ بر روی موش‌های کوچک (Kun-ming Mice) نشان داد که نانوماده آئروژل رزورسینول-فرمالدهید در دوزهای مشخص‌شده، سمیت ذاتی بسیار پایینی دارد و به‌خوبی توسط بدن تحمل می‌شود، که این موضوع راه را برای کاربردهای زیست‌پزشکی این ماده هموار می‌کند [۲۴].

۷ نتیجه‌گیری

رزین رزورسینول-فرمالدهید ماده‌ای راهبردی در صنایع مختلف باقی مانده است. پیشرفت‌های اخیر نشان داده است که اگرچه این رزین از نظر زیست‌محیطی با چالش مواجه است، اما توانایی منحصربه‌فرد آن در ایجاد چسبندگی قوی و پایداری شیمیایی و حرارتی، آن را از بسیاری از جایگزین‌ها متمایز می‌کند. آینده رزین RF به تعادل بین حفظ عملکرد و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی وابسته است. به نظر می‌رسد که استفاده از آن در ترکیب با نانومواد، به‌عنوان پوشش‌های هوشمند و پیش‌ماده آئروژل‌های پیشرفته، رشد خود را ادامه خواهد داد، در حالی که در کاربردهای حساس تایر، جایگزین‌های زیستی-پایه به تدریج سهم بازار را در اختیار خواهند گرفت.

مراجع

1. Ren Q., Sun R., Feng D., Ru H., Wang W., Zhang C., Resorcinol Formaldehyde Hydrogel: Synthesis, Polymerization, and Application in Ceramic Gel-Casting, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 647, 129192, **2022**.
2. Mulik S., Sotiriou-Leventis C., Leventis N., Time-Efficient Acid-Catalyzed Synthesis of Resorcinol-Formaldehyde Aerogels, *Chemistry of Materials*, 19, 25, 6138-6144, **2007**.
3. Aras S., Cavusoglu F.C., Unlu D., Synthesis, Characterization, and Thermal Pyrolysis Mechanism of Resorcinol-Formaldehyde Resin-Containing Phenylboronic Acid, *Advanced Engineering Materials*, 26, 15, 2400285, **2024**.
4. Alshrah M., Mark L. H., Buahom P., Lee J. H., Rezaei S., Naguib H. E., Park C. B., Next Generation Thermal Insulators for Operation in High-Temperature and Humid Environments Through Aerogel Carbonization, *Journal of Materials Chemistry C*, 11, 29, 9871-9879, **2023**.
5. Mullot J.U., Minier C., Vasseur P., Pariselli F., Billault I., Calvayrac C., Baltora-Rosset S., Resorcinol Affects Thyroid Function Leading to Harmful Effects – Proposed as SVHC under REACH. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES); **2023**.
6. Auliarta S., Sribudiani E., Somadona S., Resorcinol Formaldehyde Tannin's Adhesive Properties and Adherence to Acacia Mangium, *Perennial*, 17, 2, 35-44, **2021**.
7. Trisatya D.R., Santoso A., Abdurrachman A., Prastiwi D.A., Performance of Six-Layered Cross Laminated Timber of Fast-Growing Species Glued with Tannin Resorcinol Formaldehyde. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 51, 81-97, **2023**.
8. Galaburda M., Zienkiewicz-Strzalka M., Blachnio M., Bogatyrov V., Kutkowska J., Choma A., Derylo-Marczewska A., Ag-Containing Carbon Nanocomposites: Physico-Chemical Properties and Antimicrobial Activity – Synthesized by Carbonization of RF Polymers Filled with Ag-containing Fumed Silica at 800 °C under Inert Atmosphere, . **2024**.
9. Cassereau P., Safe and Sustainable Bonding Systems for the Tire Industry – Resorcinol- and Formaldehyde-free Adhesives. Presented at: Tire Technology Expo 2024; March 19-21, **2024**.
10. Cheng X., et al., Resorcinol-Formaldehyde Resin Combining Epoxy Resin as Composite Coating with Efficient Anti-Corrosion Resistance and Anti-Biofouling Capacity, *Progress in Organic Coatings*, 203, 109177, **2025**.
11. Yang H., Zhang M., Guan X., Shang X., A Facile Alkali-Assisted Synthesis Strategy for Hierarchical Porous Carbon Aerogels for Supercapacitors. *Molecules*. 29, 5413, **2024**.
12. Reports and Data, Resorcinol Formaldehyde Resin Market Report-Valued at USD 1.2 Billion in 2024, Projected to Reach USD 2.5 Billion by 2034 at a CAGR of %7.5, *Reports and Data*, **2024**.
13. Research and Markets, Resorcinol - Global Strategic Business Report – estimated at US\$43.3millionin2024,projectedto reachUS\$43.3millionin2024,projectedtoreachUS\$690.7 million by 2030 at a CAGR of 4.1%, *Research and Markets*, **2024**.
14. Lee S., Ko Y.-D., Adhesion Properties of Rubber and Kevlar Modified With Resorcinol-Formaldehyde Resin and Rubber Latex, *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, 24, 1, 23-30, **2007**.
15. Michelin, Q&A: Michelin Resicare on Road to RF-free Future, *European Rubber Journal*, July/August 2025, 3-49, **2025**.
16. Gao Z., He H., Yang Z., Jia L., Yu W., Liu F., Zheng Q., Improved adhesion of rubber composites by developing environmentally friendly fiber impregnation coatings with good interfacial modulus transition gradients, *Progress in Organic Coatings*, 189, 108325, **2024**.
17. Gao Z., He H., Yang Z., Jia L., Yu W., Liu F., Zheng Q., Improved Adhesion of Rubber Composites by Developing Environmentally Friendly Fiber Impregnation Coatings with Good Interfacial Modulus Transition Gradients, *Progress in Organic Coatings*, 189, 108325, **2024**.
18. Kamel M.M., Ghanem M.A., Rashwan S.M., Mahmoud M.A., El-Mekawy S.A., Mohammed K.M.H., Ibrahim H.E., Synthesis of a Resorcinol-based Derivative as a Corrosion Inhibitor for Low-carbon Steel in 0.5 mol L⁻¹ HCl Medium: Chemical, Electrochemical, and Theoretical Aspects, *RSC Advances*, 14, 27, 19428-19445, **2024**.
19. Kamel M.M., Ghanem M.A., Rashwan S.M., Mahmoud M.A., El-Mekawy S.A., Mohammed K.M.H., Ibrahim H.E., Synthesis of a Resorcinol-Based Derivative as a Corrosion Inhibitor for Low-Carbon Steel in 0.5 mol L⁻¹ HCl Medium: Chemical, Electrochemical, and Theoretical Aspects, *RSC Advances*, 14, 27, 19428-19445, **2024**.
20. Tang Y., Wu X., Zou S., Qin H., Sun K., Sun L., Hou J., Shi W., Li C., Guo F., Resorcinol-Formaldehyde Resin Combining Epoxy Resin as Composite Coating with Efficient anti-Corrosion Resistance and Anti-Biofouling Capacity, *Progress in Organic Coatings*, 203, 109177, **2025**.
21. Hao Y., Duan E., Long J., Song L., Shen Y., Liu S., Anticorrosion Mechanism of epoxy Coating Containing Mesoporous Resorcinol-Formaldehyde Hollow Nanosphere Loaded With 8-Hydroxyquinolin, *Applied Surface Science*, 677, 161014,

2024.

22. Ren J., Zhang T., Kong Y., Zhao Z., Zhu K., Zhang X., Shen X., Facile Synthesis of Phenolic-Reinforced Silica Aerogel Composites for Thermal Insulation Under Thermal-Force Coupling Conditions, *Ceramics International*, 49, 18, 29820-29828, **2023**.

23. Pargai N., Verma S.K., Shaz M.A., Physically Activated Resorcinol-Formaldehyde Derived Carbon Aerogels for En-

hanced Hydrogen Storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, 141, 803-810, **2024**.

24. Zheng G., Zhu Y., Wu B., Xu X., Cheng J., Liu Y., Huang S., Chen J., Xiong Q., Chen J., Pilot Study of Acute and Sub-chronic Oral Toxicological Biosafety Evaluation of Resorcinol-Formaldehyde Aerogel Nanomaterial in Kunming Mice, *Journal of Applied Toxicology*, 45, 5, 721-735, **2024**.

