پیشرفت‌های صورت گرفته در عرصه الیـاف زیست پایه

اطلاع‌رسانی

الیاف زیست پایه در واقع به نوعی پاسخ صنعت الیاف به درخواست های جهانی برای پایداری بوده است. با این حال واژه «الیاف زیست پایه» اغلب آزادانه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الیاف زیست پایه در یک تعریف گسترده شامل هر نوع لیفی می‌شود که دارای منشا بیولوژیکی باشد و می‌توان آن را به سه دسته مهم تقسیم کرد: الیاف طبیعی زیست پایه(برای مثال پشم، پنبه، کنف، کتان، جوت)؛ الیاف بازیابی شده(برای مثال سلولز، پروتئین، کیتوسان) و الیاف مصنوعی زیست پایه(برای مثال پلی لاکتیک اسید). ممکن است بعضی از تعاریف این سه دسته مهم را شامل نشود برای مثال الیاف مصنوعی زیست پایه چون اصلاح شیمیایی شده‌اند اغلب از این تعریف مستثنی‌هستند.

علاوه بر آن هر گروه می تواند تعاریف مختلفی داشته باشد. برای مثال بعضی از سازمان‌ها الیاف بازیابی شده را به عنوان الیاف سلولز بازیابی شده تعریف می‌کنند(برای مثال ویسکوز، مودال، لایوسل) در حالی که در تعاریف دیگر الیاف بازیابی شده مشابه سلولز (برای مثال الیف پروتئین سویا، الیاف کیتوسان) و حتی الیاف سلولزی اصلاح شده(برای مثال الیاف استات) را نیز در بر می‌گیرد.

از سوی دیگر واژه‌های زیست پایه و زیست تجزیه پذیر اغلب به جای هم به کار می روند ولی الیاف زیست پایه لزوما زیست تجزیه پذیر نیستند و بالعکس. به طور خلاصه تمامی الیاف طبیعی و بازیابی شده زیست تجزیه پذیر هستند اما الیاف مصنوعی زیست پایه می‌توانند زیست تجزیه پذیر باشند(برای مثال پلی لاکتیک اسید) و یا زیست تجزیه پذیر نباشند(برای مثال پلی تری متیلن ترفتالات زیست پایه).

در این مقاله نگاهی خواهیم داشت به پیشرفت‌هایی که در عرصه فناوری‌ها و بازار برخی از شاخص‌ترین الیاف زیست پایه صورت گرفته است.

*** الیاف طبیعی زیست پایه**

الیاف طبیعی بر اساس منشا آنها سه نوع هستند: معدنی، حیوانی و گیاهی. الیاف گیاهی و الیاف حیوانی زیست پایه هستند اما الیاف معدنی(برای مثال آزبست) جزو الیاف زیست پایه به حساب نمی آید. الیاف طبیعی حیوانی شامل موی حیوان(برای مثال پشم، کشمیر، شتر) و پیله(ابریشم) و الیاف گیاهی شامل الیاف به دست آمده از دانه(برای مثال پنبه)، پوسته(برای مثال کنف، جوت، کتان، رامی) و برگ(برای مثال آناناس) گیاهان می شوند.

استفاده از الیاف طبیعی به دوران قبل از تاریخ ثبت شده برمی‌گردد. امروزه بازار الیاف نساجی طبیعی زیست پایه تحت سلطه پنبه بوده و این لیف حدود ۹۰ درصد سهم بازار را به خود اختصاص می‌دهد و پس از آن الیاف پشم، الیاف به دست آمده از پوست و برگ درختان و ابریشم قرار دارند.

پنبه به تنهایی نزدیک به یک چهارم تولیدات جهانی الیاف نساجی را به خود اختصاص می‌دهد.

بر اساس برآورد کمیته مشورتی بین المللی پنبه(ICAC)، تولید جهانی پنبه در سال ۲۳-۲۰۲۲، ۲۴/۵۵ میلیون تن بوده که نسبت به ۲۵/۱۸ میلیون تن در سال ۲۲-۲۰۲۱ کمتر شده است.

با این حال آینده کشت پنبه تحت تاثیر عواملی چون نیاز به زمین های زراعی وسیع، مصرف آب زیاد و استفاده گسترده از کودها و آفت‌کش‌ها با محدودیت‌هایی روبروست. پاسخ صنعت الیاف به این مسائل و مشکلات پرورش پنبه ارگانیک یا تولید الیاف از پوست و برگ گیاهان می‌باشد که نیازمند زمین کمتر و مصرف آب، کود و آفت‌کش پایین‌تر هستند.

پرورش پنبه ارگانیک در سال های اخیر شاهد پیشرفت هایی بوده است. بر اساس داده‌های Textile Exchange، میزان تولید پنبه ارگانیک در سال ۲۰۲۰/۲۱،

۳۴۲۲۶۵ میلیون تن بوده که در مقایسه با سال ۲۰–۲۰۱۹، ۳۷ درصد افزایش داشته و ۱/۴ درصد کل پنبه های کشت شده را نیز به خود اختصاص داده است.
با این حال بر اساس گزارش سازمان توسعه و همکاری اقتصادی(OECD) مجموع تولیدات پنبه همچنان پایین است و بر اساس پیش‌بینی‌ها تنها ۱/۵ درصد رشد سالیانه خواهد داشت و تا سال ۲۰۳۰ تولید آن به ۲۸ میلیون تن خواهد رسید.
از سوی دیگر بعضی از الیاف به دست آمده از پوست و برگ گیاهان دارای خصوصیات و مزایای منحصر به فردی هستند نظیر استحکام و انعطاف پذیری بیشتر که امکان استفاده از آنها در طیف گسترده ای از موارد کاربردی را فراهم می کند و بازار بزرگی ایجاد می‌نماید.
با این حال این الیاف معایبی نیز دارند نظیر سختی پردازش یا ریسندگی، گران بودن و راحتی کمتر در مقایسه با پنبه که باعث می‌شود رقابت پذیری آنها در مقابل سایر الیاف محبوب خدشه دار شود.
علاوه بر آن تولید الیاف حاصل از برگ و پوست گیاهان به شدت وابسته به آب و هوا، قیمت، مشوق‌های اقتصادی کشاورزان و سایر عوامل می‌باشد. تمامی عوامل گفته شده از پتانسیل سهم داشتن این الیاف از رشد الیاف طبیعی می کاهد.
به گزارش سازمان غذا و کشاورزی(FAO)، مجموع تولید توو و الیاف کتان در سال ۲۰۰۵ به بالاترین مقدار خود یعنی ۱/۵ میلیون تن(شامل موارد کاربردی نساجی و غیرنساجی) و در سال ۲۰۱۱ به پایین ترین مقدار خود یعنی ۰/۴۹ میلیون تن رسیده است. میانگین رشد سالانه از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۱ تنها ۰/۴ درصد بوده است.

*** الیاف بازیابی شده**

تاریخچه الیاف سلولزی به بیشتر از ۱۶۰ سال قبل برمی گردد. ریون که در سال ۱۸۴۶ به منظور جایگزینی برای ابریشم توسعه یافته است، نخستین لیف سلولزی جهان و همچنین نخستین لیف بشرساخت است.
الیاف سلولزی از منابع طبیعی سلولز مانند پالپ پنبه و پالپ چوب؛ حل کردن آنها در مواد شیمیایی و تبدیل به الیاف حاصل می‌شوند.
سلولز که بخشی از تمامی گیاهان مهم است، زیست پایه و زیست تجزیه پذیر بوده و تجزیه آن به هیچ وجه باعث تولید ذرات میکروپلاستیکی نمی‌شود. بنابراین تولیدکنندگان الیاف سلولزی ادعای پایدار بودن می‌کنند که همین باعث رشد

سالانه بیش از ۵ درصدی تولید این الیاف در سال‌های اخیر شده است.
با این حال موانعی نیز وجود دارد که از رشد بیشتر الیاف سلولزی جلوگیری می کند.
برای مثال تامین مواد اولیه خام الیاف سلولزی به شدت وابسته به چوب و پنبه است اما تولید پنبه راکد بوده و مقدار سلولز به دست آمده از چوب نیز کم است.
از طرفی آنالیز چرخه عمر گهواره تا گور که مزایای سلولز را ثابت کند وجود ندارد، در واقع فرایند استاندارد تولید سلولز ممکن است شامل شستشو و سفیدگری با کلر یا سایر مواد شیمیایی باشد که باعث تشدید آلاینده ها می‌شود.
در حاضر محققان به راهکارهای جدیدی برای حل این مشکلات دست یافته اند. تولیدکنندگان با آنالیز چرخه عمر بر اساس فناوری‌های نوآورانه مزایای مربوط به پایداری این الیاف را نشان داده‌اند برای مثال فرایندهای کارآمد از نظر مصرف انرژی برای جداسازی تمیز سلولز از لیگنین و همی سلولز یا سیستم های بازیافت حلقه بسته برای جداسازی و استفاده مجدد از آب، گاز و مواد شیمیایی در فرایندهای تولیدی.
سلولز را می‌توان از کاه، باگاس(تفاله ای که پس از استخراج شکر از نیشکر حاصل می شود)، بامبو، دیواره سلولی جلبک سبز و غشای بیشتر قارچ ها به دست آورد.
با استفاده از فناوری‌های جدید می‌توان از این مواد اولیه به جای چوب و پنبه در تولید الیاف سلولزی استفاده کرد.
برای مثال شرکت چینیQingdao Yuanhai New Material Technologyدر سال ۲۰۱۹ نخستین کارخانه تجاری تولید الیاف آلجینات را افتتاح کرد.
ظرفیت تولید این کارخانه ۵۰۰۰ تن در سال است. الیاف آلجینات در منسوجات بی‌بافت، پوشاک و منسوجات پزشکی مورد استفاده قرار می گیرند.
برای کاهش مصرف چوب و پنبه الیاف مشابه سلولز نیز توسعه یافته اند. برای مثال می‌توان به الیاف کیتوسان و الیاف پروتئین اشاره کرد. کیتوسان یک پلیمر زیستی مشابه سلولز است که از کیتین– دومین پلیمر طبیعی در جهان پس از سلولز از نظر حجم تولید سالانه– به دست می‌آید.
الیاف کیتوسان زیست پایه؛ زیست تجزیه پذیر، غیرسمی و زیست سازگار هستند. با این حال این الیاف دارای محدودیت‌هایی نیز می باشند نظیر استحکام حرارتی و مکانیکی ضعیف. در حال حاضر چندین شرکت کارخانجات تولید الیاف کیتوسان را در مقیاس صدها تن در سال احداث کرده‌اند.

*** الیاف مصنوعی زیست پایه**

الیاف مصنوعی زیست پایه از سنتز بیولوژیکی یا شیمیایی مواد اولیه ارگانیک تجدیدپذیر تولید می‌شوند. پلی لاکتیک اسید نخستین الیاف مصنوعی زیست پایه است که برای اولین بار بیشتر از ۱۵۰ سال پیش تولید شد اما تا اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ و زمانی که شرکت‌های دوپونت و کارگیل کاربردهای لاکتیک اسید، لاکتید و پلی لاکتیک اسید را کشف کردند، هنوز به تولید تجاری نرسیده بود.
کارگیل برای نخستین بار در سال ۱۹۹۴ در کارخانه ای با ظرفیت ۶۰۰۰ تن در سال به تولید الیاف پلی لاکتیک اسید و توسعه یک فرایند مداوم برای تولید لاکتید بر اساس فرایند تقطیر واکنشی پرداخت.

در حال حاضر بازار الیاف مصنوعی زیست پایه تحت سلطه الیاف پلی تری متیلن ترفتالات(PTT)، الیاف پلی لاکتیک اسید(PLA)، الیاف پلی اتیلن ترفتالات(PET) و الیاف پلی آمید(PA) است.

الیاف پلی بوتیلن سوکسینات(PBS)، الیاف پلی هیدروکسی آلکونات(PHAs) و چند لیف دیگر نیز نشانه‌های مثبتی از خود نشان داده اند. الیاف PLA، PBS و PHAs زیست تجزیه‌پذیر و الیاف PTT، PA و PET زیست تجزیه ناپذیر هستند

بر اساس پیش‌بینی European Bioplastics e.V. و سایر منابع، الیاف مصنوعی زیست پایه پتانسیل رشد بالای حدود ۲۵ درصدی را از سال ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۷ دارند.

البته اندازه بازار این الیاف تا سال ۲۰۲۲ تنها ۲۰۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ تن بوده که بسیار کوچک تر از بازار الیاف بازیابی شده(بیش از ۷/۵ میلیون تن) و الیاف نساجی طبیعی زیست پایه(تقریبا ۲۷ میلیون تن) می باشد.

بر اساس این اطلاعات و تجزیه و تحلیل ها می‌توان چنین تخمین زد که امکان تولید تقریبا ۳ میلیون تن الیاف بازیابی شده بیشتر، ۲ میلیون تن الیاف طبیعی زیست پایه بیشتر و ۰/۵ میلیون تن الیاف مصنوعی زیست پایه بیشتر در صنعت جهانی الیاف در سال ۲۰۲۷ در مقایسه با سال ۲۰۲۲ وجود دارد.

*** الیاف پلی لاکتیک اسید**

پلی‌لاکتیک اسید از مشتقات محصولات کشاورزی بوده و می توان با تخمیر میکروبی مونومرهای آن را تولید کرد. این پلیمر برای تبدیل شدن به الیاف از طریق فرایند ذوب ریسی مناسب است.

فرایند ذوب ریسی در مقایسه با فرایند حلال ریسی که در تولید الیاف سلولزی مصنوعی مورد استفاده قرار می گیرد ارزان تر بوده و الیافی با ویژگی‌های بهتر تولید می کند. الیاف پلی لاکتیک اسید غیرسمی و کاملا زیست تجزیه پذیر هستند.

بر اساس پیش‌بینی دیگری از European Bioplastics e.V. ظرفیت جهانی پلیمرهای پلی‌لاکتیک اسید به دلیل احداث یک سری کارخانجات بزرگ در آسیا، آمریکای شمالی و اروپا دارای نرخ رشد ترکیبی سالانه ۳۹ درصد خواهد بود و از ۴۶۰۰۰۰ تن به ۲/۳۸ میلیون تن خواهد رسید. در سال ۲۰۲۲ حدود ۱۰ درصد این ظرفیت یا ۵۰۰۰۰ تن در بخش الیاف مورد استفاده قرار گرفت.

از نظر تاریخی همیشه رشد بخش الیاف کمی پایین تر از کل بازار پلی لاکتیک اسید بوده است و چنانچه این روند ادامه داشته باشد، الیاف پلی لاکتیک اسید می‌توانند با نرخ رشد ترکیبی سالانه بین ۳۵–۳۰ درصد از سال ۲۰۲۲ تا سال ۲۰۲۷ رشد کرده و به ظرفیتی بین ۱۸۶۰۰۰ و ۲۲۴۰۰۰ تن در سال برسند.

پلی لاکتیک اسید اصلاح نشده یک سری محدودیت هایی دارد نظیر شکنندگی به ویژه در دمای پایین تر از $45\ ^{\circ}F$ و دمای خمش گرمایی پایین. چشم انداز بسیار مثبت برای بازار این الیاف منجر به بروز نوآوری هایی برای اصلاح پلی لاکتیک اسید به ویژه از سه طریق شده است: اصلاح شیمیایی، اصلاح فیزیکی و اصلاح با عامل سازگار کننده.

روش‌های اصلاح شیمیایی شامل کوپلیمریزاسیون دسته‌ای، کوپلیمریزاسیون پیوندی، اتصالات عرضی، گسترش زنجیره پلیمری برای بهبود استحکام کششی، مدول کششی، ثبات حرارتی و زیست سازگاری الیاف پلی لاکتیک اسید است.

در اصلاح فیزیکی از مواد ترموپلاستیک(مانند پلی اتر–اتر کتون)، رزین‌های زیست تجزیه‌پذیر(برای مثال پلی کاپرولاکتون)، الاستومرها، لاستیک ها، نانوذرات، پلیمرهای دسته ای، پلیمرهای پیوندی یا سایر الیاف برای بهبود استحکام کششی، مدول کششی، ثبات حرارتی، بلورینگی، زیست تجزیه پذیری، زیست سازگاری و ازدیاد طول تا حد پارگی استفاده می‌شود.

از عوامل سازگارکننده (برای مثال پلی‌بوتیلن سوکسینات و اتیلن گلایکول متاکریلات) برای بهبود استحکام کششی ویژه الیاف پلی لاکتیک اسید استفاده می شود.

علاوه بر سه روش فوق نوآوری های فنی برای الیاف پلی لاکتیک اسید نیز بر روی این بخش‌ها تمرکز دارند: فناوری های تخمیر، جداسازی و خالص سازی ماده اولیه خام پلی لاکتیک اسید یعنی لاکتیک اسید، فناوری های رنگرزی سبز برای الیاف و نخ‌های پلی لاکتیک اسید، طراحی کارخانجات ذوب ریسی در مقیاس صنعتی و ایجاد ویژگی‌های مازاد برای الیاف پلی‌لاکتیک اسید مانند عملکرد کندکنندگی شعله و ضدباکتریایی.

*** الیاف پلی هیدورکسی آلکانوت ها(PHAs) و پلی بوتیلن سوکسینات(PBS)**

پلی هیدروکسی آلکانوت‌ها در محیط های آبی و خاکی زیست تجزیه پذیر هستند. شاخص‌ترین پلی هیدروکسی آلکانوت که به صورت تجاری در دسترس است پلی‌هیدروکسی بوتیرات(PHB) و پلی هیدروکسی بوتیرات هیدروکسی والرات(PHBV) می‌باشد.

در حال حاضر شرکت آمریکایی DANIMER SCIENTIFIC و شرکت های چینی، آلمانی، ایتالیایی و برزیلی مهم‌ترین تامین کنندگان پلی هیدروکسی آلکانوت‌ها به شمار می‌روند.
شرکت دانیمر ساینتیفیک برآورد می کند که بازار پلی هیدروکسی آلکونات پتانسیل رسیدن به ۲۳۰ میلیون تن در سال را دارد.
با این حال امروزه صنعت پلی هیدروکسی آلکانوت همچنان در مراحل اولیه رشد خود قرار دارد و ظرفیت جهانی آن حدود ۵۰۰۰۰ تن در سال است.
علاوه بر آن الیاف تنها قسمتی از کاربردهای پلی هیدروکسی آلکانوت ها هستند.
در سال ۲۰۲۲ مجموع تولید جهانی الیاف پلی هیدروکسی آلکانوت ها کمتر از ۱۰۰۰ تن بوده است.
الیاف PHBV زیست سازگار و زیست تجزیه پذیر هستند و در نتیجه برای استفاده در منسوجات پزشکی یک ماده اولیه ایده‌آل به شمار می‌روند. در حال حاضر شرکت چینی TIANAN بزرگ‌ترین تامین کننده PHBV است.
با این حال الیاف PHBV دارای محدودیت‌هایی نیز هستند نظیر شکنندگی، ثبات حرارتی پایین و فرایندپذیری سخت. در حال حاضر محققان از روش های کوپلیمریزاسیون دسته‌ای، کوپلیمریزاسیون پیوندی، اصلاح فیزیکی و غیره برای حل این مشکلات استفاده می کنند.
پلی هیدروکسی بوتیرات که ساده‌ترین پلی هیدروکسی آلکانوت با خواصی مشابه پلی پروپیلن است، با پردازش گلوکز یا نشاسته توسط باکتری تولید می شود. شرکت آلمانی BIOMER با استفاده از اکسترودر رزین را به الیاف چندفیلامنتی مورد استفاده در چسب‌های جراحی تاری پودی تبدیل می کند.
از سوی دیگر پلی‌بوتیلن سوکسینات یک پلی‌استر زیست پایه با خواصی مشابه پلی‌اتیلن است. این الیاف دارای خواص مکانیکی و زیست تجزیه پذیری عالی بوده و ثبات حرارتی آن خوب است که باعث می‌شود کاربردهای زیادی داشته باشد از بسته بندی مواد غذایی گرفته تا محصولات بهداشتی.
در حال حاضر تولید الیاف پلی بوتیلن سوکسینات در مقیاس تجاری همچنان در مراحل ابتدایی خود قرار دارد. با این حال یک محصول برجسته و قابل توجه برای دهه آینده به شمار می‌رود.

*** الیاف مصنوعی زیست پایه زیست تجزیه ناپذیر**

بازار الیاف مصنوعی زیست پایه زیست تجزیه ناپذیر تحت سلطه الیاف پلی‌تری‌متیلن ترفتالات زیست پایه و پس از آن الیاف پلی آمید و الیاف پلی اتیلن ترفتالات زیست پایه قرار دارد.
با توجه به کند بودن رشد بخش‌های مربوط به الیاف پلی تری متیلن ترفتالات و پلی اتیلن ترفتالات، مهم ترین عامل رشد ظرفیت این بازار الیاف زیست پایه پلی آمید است.
امروزه غول‌های پتروشیمی یعنی شرکت های BASF، دوپونت و آرکما بازار پلی آمید زیست پایه را در اختیار گرفته اند.
شرکت BASF در سال ۲۰۰۷ نایلون ULTRAMID BALANCE ۶/۱۰ را به بازار عرضه کرد که حدود ۶۰ درصد آن را سباسیک اسید که از مشتقات روغن کرچک است، تشکیل می‌دهد.
در سال ۲۰۰۹ دوپونت خانواده ZYTEL را ارایه کرد که شامل نایلون ۱۰/۱۰ و نایلون ۶/۱۰ به همراه کوپلیمرهای آن ها و آلیاژ آن ها با سایر پلیمرها می‌شود. نایلون ۱۰/۱۰ دوپونت حاوی صددرصد و نایلون ۶/۱۰ حاوی ۶۳ درصد محتوای سباسیک اسید می باشد.
شرکت چینی CATHEY در سال ۲۰۲۱ با ظرفیت تولید سالانه ۱۰۰۰۰۰ تن PA۵۶ که ۴۵ درصد آن بر پایه منابع تجدیدپذیر است، وارد عرصه رقابت شد.
در حال حاضر ظرفیت جهانی تولید رزین‌های پلی آمید زیست پایه در صورت اندازه گیری بر حسب مقدار محتوای مواد زیست پایه آنها بیش از ۲۰۰ میلیون تن می‌باشد.
از این میزان حدود ۴۰۰۰۰ تن برای تولید الیاف مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به گسترش ظرفیت کارخانجات پیش بینی می‌شود؛ ظرفیت جهانی تولید الیاف پلی آمید زیست پایه تا سال ۲۰۲۷ بالغ بر ۱۰۰۰۰۰ تن شود.
از سوی دیگر پلی تری متیلن ترفتالات یک پلی استر آروماتیک خطی است که از ۱و۳-پروپاندیول(PDO) تهیه می‌شود.
نسخه زیست پایه این پلیمر برای نخستین بار توسط کمپانی دوپونت و زمانی که الیاف پلی‌تری‌متیلن ترفتالات SORONA که از راه تخمیر زیست توده شکر و گلوکز و از ۱و۳-PDO زیست پایه ارایه شد، تجاری سازی شده است.
در حال حاضر الیاف پلی تری متیلن ترفتالات با ظرفیت تولید بیش از ۲۰۰۰۰۰ تن در سال مهم ترین الیاف مصنوعی زیست پایه به شمار می‌رود.
از طرفی پلی‌اتیلن ترفتالات زیست پایه بیشتر در تولید بطری‌های پلاستیکی استفاده می‌شود و تنها حدود ۱۰۰۰۰ تن از آن به تولید الیاف اختصاص می‌یابد.
تولیدکنندگان اصلی الیاف پلی‌تری‌متیلن فتالات زیست پایه کمپانی آمریکایی دوپونت و کمپانی چینی شنگونگ و گلوری هستند.
در حال حاضر تولیدکنندگان الیاف شرکت‌های نساجی را برای استفاده از الیاف پلی‌تری‌متیلن ترفتالات زیست پایه در منسوجات خانگی و منسوجات صنعتی تحت فشار می‌ذارند.
این الیاف دارای بازیابی کشسش، نرمی و رنگ پذیری خوبی در صورت استفاده در پوشاک هستند ضمن این که انعطاف پذیری، راحتی پوشش، رنگ پذیری، مقاومت استاتیک و مقاومت در برابر مواد شیمیایی آنها در هنگام استفاده در منسوجات خانگی و منسوجات صنعتی عالی است.
امروزه در صنایع رزین PTT و PET زیست پایه مازاد ظرفیت وجود دارد.
در نتیجه تا چند سال آینده برای هیچ پروژه ای در رابطه با تولید رزین زیست پایه PTT و PET در مقیاس بزرگ برنامه ریزی نشده است. با این حال احتمال رشد چشمگیر استفاده از الیاف PTT و PET در دوره پیش رو وجود دارد.

مرجع:

Jason Chen, "Advances in Bio-Based Fibers", International Fiber Journal, September 2023

تهیه و تنظیم: اکرم باقری توستانی