Journal of Advanced Materials and Technologies

Journal Homepage: www.jamt.ir

Materials and Energy Research Center

MERC

Original Research Article - Extended Abstract

Recycling Technologies and Waste Management of Wind Turbine Composite Blades

Abolfazl Pourrajabian [1*], Mahsa Ghasemizadeh [2], Maziar Dehghan [3], Saeed Rahgozar [1]

[1] *Assistant Professor, Department of Energy, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.*
[2] *MSc, Department of Energy, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.*
[3] *Associate Professor, Department of Energy, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.*

*Corresponding Author's Email: a.pourrajabian@merc.ac.ir (Abolfazl Pourrajabian)

Paper History:
Received: 2024-08-16
Revised: 2024-10-28
Accepted: 2024-11-06

Keywords:
Wind Energy,
Wind Turbine,
Composite Blade,
Recycling,
Waste Management

Abstract: To address climate change issue and transition from fossil fuels to renewable energy, wind energy plays a pivotal role. Several countries have installed wind turbines in the past years and have long-term plans to harness wind energy in the coming decades. Given the large number of these turbines and their limited lifespan, typically ranging from 20 to 30 years, managing the waste from their components has become a significant challenge. In particular, the recycling of wind turbines blades, mostly made of fiberglass composites, is a difficult task. It is predicted that by the end of 2050, approximately 43 million tons of blades will reach the end of their operational life. The present study introduces the waste management and recycling technologies for these blades. Following the waste management hierarchy, which consists of the prevention, reuse, repurpose, recycling, recovery, and disposal, the three key recycling methods_ mechanical, thermal, and chemical_ are thoroughly examined. The chemical method can be applied not only to new blades but also to older ones, bringing them back to the recycling process and contributing to the production of new-generation blades, thereby supporting the development of a circular economy.

https://doi.org/10.30501/jamt.2024.473762.1305 URL: https://www.jamt.ir/article_209448.html

1. INTRODUCTION

When it comes to the current main issue of the world, the climate change, the main priority of governments and decision makers is to harness renewable energy as much as possible. Through the deployment of energy harvester devices, countries try to mitigate the destructive effects of fossil fuels. Among the clean and sustainable sources of energy, the wind plays an impactive role. Today, the installed capacity of wind turbines around the world is approaching 1000 GW, thanks to technological advancement as well as the continuous decline in the total cost over the past years. The installed capacity of wind energy by the end of 2022 in the European Union, the United States, China and other different regions of the world is shown in Figure 1. Blades, as the most important parts of the turbine, convert the kinetic energy of the airflow into the mechanical energy. To increase the capacity of the turbines, larger blades are required. Considering the lifespan of wind turbines, which is typically between 20 and 30 years, their first generation is about to be out of service, and the waste management of such large composite blades becomes a serious challenge. Based on a 20-year useful life for turbines and considering a weight of 10 tons per MW, it is expected that by the end of 2042, the wind energy industry will face 8.6 million tons of blades that have reached the end of their life (Delaney et al., 2023). Additionally, studies indicate that by 2050, about 43 million tons of waste blade will be produced, among which the share of China will be 40%, Europe 25%, the rest of the regions 19%, and the United States 16% (Liu and Barlow, 2017). Figure 2 shows the blade material with respect to the decommissioning interval for different regions of the world.

2. METHOD

Figure 3 depicts the waste hierarchy for sustainable blade waste management, consisting of the prevention, reuse, repurpose, recycling, recovery, and disposal. Among these six options, the recycling approach has garnered more attention by researchers. This has been explored through experimental studies using three important techniques: mechanical, thermal, and chemical methods, all of which are examined in detail.

Please cite this article as: Pourrajabian, A., Ghasemizadeh, M., Dehghan, M. & Rahgozar, S. (2024) Recycling Technologies and Waste Management of Wind Turbine Composite Blades. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 13, No. 3, 28-39. https://doi.org/10.30501/jamt.2024.473762.1305.

2783-0829/© 2024 The Author(s). Published by MERC.
This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode)

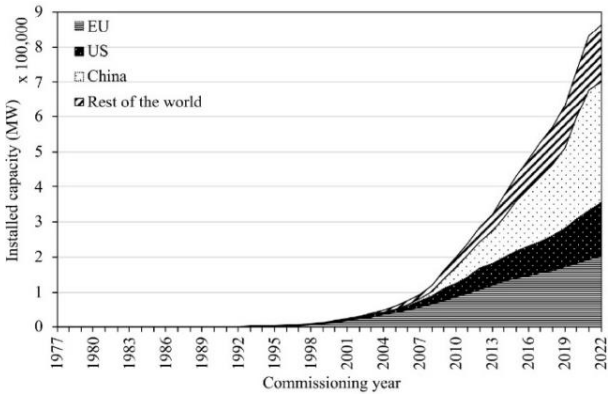


Figure 1. Total installed wind capacity in the world by 2022 (Delaney et al., 2023)

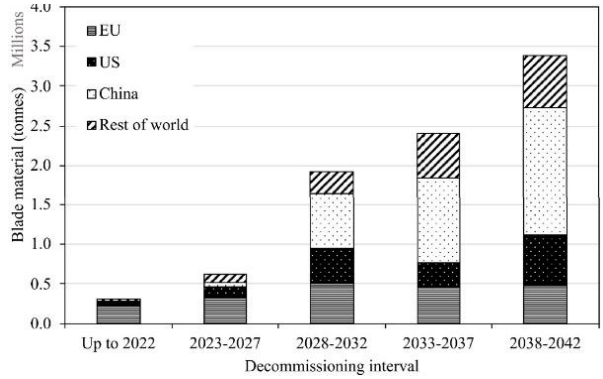


Figure 2. The amount of blades that are out of service after the end of their working lifetime (Delaney et al., 2023)

Figure 3. The waste hierarchy for sustainable blade waste management.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Different solutions for the sustainable blade waste management procedure are proposed as follows:

Prevention: This solution is primarily achieved by extending the blades' lifetime through technological advancement and timely maintenance operations.

Reuse: After reaching the end of their lifespan, the blades could be overhauled and reused. The second-hand market also offers opportunities for selling and reusing them in other turbines.

Repurpose: In this case, the blades could be repurposed as bike shelters, bridge support, house structure, and more (Jensen and Skelton, 2018);

Recycling: This approach, widely used by researchers, consists of three techniques including the mechanical, thermal, and chemical.

Recovery: The process of converting waste materials into the energy or usable materials is often done through incineration to recover energy. This solution is of particular interest to heat-demanding industries such as cement factories (Jacoby M. 2022).

Disposal: This solution, which is not suggested, involves wither landfilling the blades or incinerating them without energy recovery.

4. CONCLUSION

Although chemical recycling techniques require more energy compared to the mechanical and thermal ones, they can be applied not only to new blades but also to old ones, returning them to the recycling process and manufacturing new generation of blades, thereby promoting a circular economy. This technique holds promise as it proposes a sustainable approach for managing composite-based materials used across different industries.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the Materials and Energy Research Center (MERC) for providing the resources involved in the study.

REFERENCES

1. Delaney, E. L., Leahy, P. G., McKinley, J. M., Gentry, T. R., Nagle, A. J., Elberling, J., & Bank, L. C. (2023). Sustainability Implications of Current Approaches to End-of-Life of Wind Turbine Blades—A Review. *Sustainability*, *15(16)*, 12557. https://doi.org/10.3390/su151612557
2. Jacoby M. 2022, Recycling wind turbine blades. *C&EN ACS Publications* *100* (27), pp 26–30. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cen-10027-cover
3. Jensen, J. P., & Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 165-176. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041
4. Liu, P., & Barlow, C. Y. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, *62*, 229-240. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007

فصلنامه مواد و فناوری‌های پیشرفته

Journal Homepage: www.jamt.ir

MERC

مقاله‌ی کامل پژوهشی

فناوری‌های بازیافت پره‌های کامپوزیتی توربین بادی و مدیریت پسماند آن‌ها

ابوالفضل پوررجبیان[1*]، مهسا قاسمی‌زاده[2]، مازیار دهقان[3]، سعید رهگذر[1]

[1] استادیار، پژوهشکده‌ی انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

[2] کارشناس ارشد، پژوهشکده‌ی انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

[3] دانشیار، پژوهشکده‌ی انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۳/۰۵/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷

پذیرش قطعی: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶

کلیدواژه‌ها:

انرژی بادی،

توربین بادی،

پره‌ی کامپوزیتی،

بازیافت،

مدیریت پسماند

چکیده انرژی بادی در مقابله با تغییر اقلیم و اهمیت گذار انرژی و جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر سهم بسزایی ایفا می‌کند. کشورهای متعددی در جهان از سالیان گذشته اقدام به نصب توربین‌های بادی کردند و برنامه‌هایی بلندمدت برای بهره‌گیری از انرژی بادی در دهه‌های آتی دارند. نظر به تعداد زیاد این توربین‌ها و عمر کاری آن‌ها (۲۰ تا ۳۰ سال)، موضوع مدیریت پسماند اجزای آن‌ها به چالشی جدی تبدیل شده است، به‌ویژه آنکه اولین نسل توربین‌های بادی در شرف ازکارافتادگی و پایان طول عمر خود قرار دارد. از میان اجزای توربین‌های بادی، بازیافت و مدیریت پسماند پره‌های آن، که اکثراً از جنس کامپوزیت‌های برپایه‌ی الیاف فایبرگلاس هستند، دشوارتر است. پیش‌بینی می‌شود که تا پایان ۲۰۵۰ در حدود ۴۳میلیون تُن پره به پایان عمر کاری خود می‌رسند. پژوهش حاضر به معرفی و بررسی فناوری‌های بازیافت پره‌های توربین بادی و مدیریت پسماند آن‌ها می‌پردازد. در این خصوص، سلسله‌مراتب مدیریت پسماند پره‌ها شامل شش گروه اجتناب، استفاده‌ی مجدد، تغییر کاربری، بازیافت، بازیابی و دفع معرفی شده که در این میان و به‌طور خاص فناوری‌های بازیافت مکانیکی، حرارتی و شیمیایی بررسی و با هم مقایسه شده‌اند. روش بازیافت شیمیایی نه‌تنها قابلیت اعمال بر روی پره‌هایی را که جدید ساخته می‌شوند داشته، بلکه قادر بوده بر روی پره‌هایی که در حال کار هستند نیز اعمال شود و آن‌ها را پس از اتمام عمر کاری به چرخه‌ی ساخت پره‌های جدید بازگرداند که نوید اقتصاد چرخشی را می‌دهد.

https://doi.org/10.30501/jamt.2024.473762.1305 URL: https://www.jamt.ir/article_209448.html

۱- مقدمه

به‌منظور جلوگیری از تغییرات زیست‌محیطی و تغییر اقلیم، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر اولویت اصلی کشورهای جهان شده است. توربین‌های بادی نقش مؤثری در افزایش سهم منابع تجدیدپذیر دارند، به‌گونه‌ای که ظرفیت نصب توربین‌های بادی در حال نزدیک شدن به عدد ۱۰۰۰ گیگاوات است. ظرفیت نصب‌شده‌ی انرژی بادی تا پایان ۲۰۲۲ در اتحادیه‌ی اروپا، امریکا، چین و سایر مناطق دیگر جهان در شکل ۱ نشان داده شده است. اتحادیه‌ی اروپا و امریکا از دهه‌ی ۱۹۹۰ به نصب توربین‌های بادی پرداختند. چین با تأخیر این فرایند را آغاز کرد و توانست در ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶ به‌ترتیب از امریکا و اتحادیه‌ی اروپا پیشی بگیرد (Cooperman et al., 2021). گفتنی است که برای افزایش ظرفیت توربین‌ها نیاز به پره‌های بزرگ‌تر است تا بتوانند بخش بیشتری از انرژی جنبشی موجود در جریان هوا را به انرژی مکانیکی تبدیل کنند. پره‌ها، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های توربین، انرژی جنبشی موجود در جریان هوا را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند.

در حدود ۸۰-۸۵ درصد مواد تشکیل‌دهنده‌ی توربین‌های بادی از فلزات ساخته می‌شوند (Cooperman et al., 2021). مواد مذکور در برج توربین (از جنس فولاد) و اجزای درون

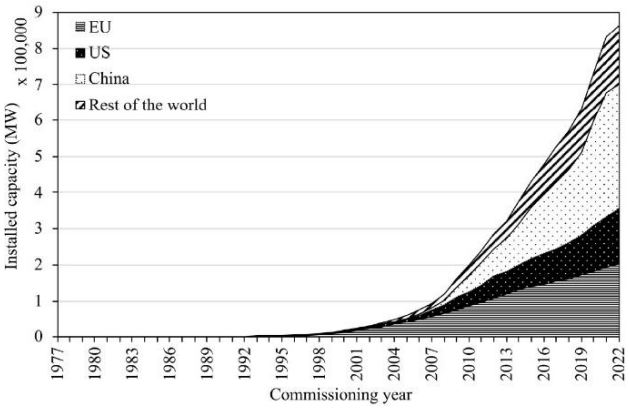
*عهده‌دار مکاتبات: ابوالفضل پوررجبیان

نشانی: کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده‌ی انرژی، تلفن: ۰۲۶۳۶۲۸۰۰۴۰، دورنگار: ۰۲۶۳۶۲۰۱۸۸۸

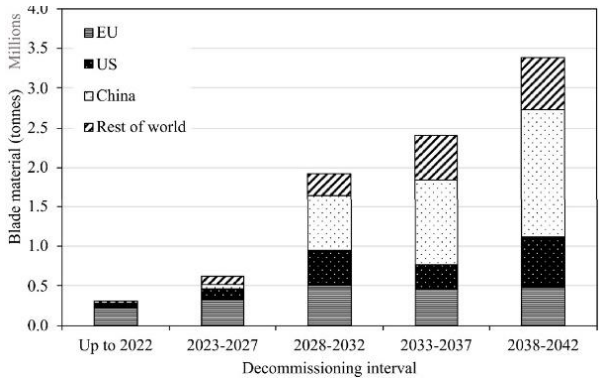
پیام‌نگار: a.pourrajabian@merc.ac.ir

ماشین‌خانه[1]ی توربین (مانند ژنراتور، جبه دنده و ادوات کنترلی) استفاده می‌شود که اغلب از جنس فولاد، مس و آلومینیم هستند. درواقع، در حدود ۸۵-۹۵ درصد یک توربین بادی قابل‌بازیافت است، اما بازیافت پره‌های کامپوزیتی کاری دشوار است. عموماً پره‌های توربین‌های بزرگ از جنس مواد کامپوزیتی سبک، مستحکم و باثبات هستند (Cooperman et al., 2021). کامپوزیت‌های به‌کاررفته بین ۸۰-۹۰ درصد از وزن پره را تشکیل می‌دهند که ۶۰ تا ۷۰ درصد آن را الیاف پلیمری تقویت‌شده و ۳۰ تا ۴۰ درصد را رزین تشکیل می‌دهند (Jensen & Skelton, 2018).

با در نظر گرفتن عمر ۲۰-۳۰ سال (Ortegon et al., 2013) برای توربین‌های بادی، اولین نسل آن‌ها در شرف ازکارافتادگی و در پایان طول عمر خود قرار دارند و مدیریت پسماند پره‌های کامپوزیتی کار دشواری شده است. براساس عمر مفید کاری ۲۰ساله برای توربین‌ها و در نظر گرفتن وزن ۱۰ تُن به‌ازای هر مگاوات، انتظار می‌رود تا پایان ۲۰۴۲، صنعت انرژی بادی با ۸/۶میلیون تُن پره، که به پایان عمر خود رسیده‌اند، مواجه باشد (Delaney et al., 2023). همچنین، بررسی‌ها حاکی از آن است که تا ۲۰۵۰، میزان ۴۳میلیون تُن پسماند پره تولید می‌شود که سهم چین ۴۰ درصد، اروپا ۲۵ درصد، امریکا ۱۶ درصد و مابقی مناطق ۱۹ درصد خواهد بود (Liu & Barlow, 2017). شکل ۲ مقدار جرم (میلیون تُن) پره‌های ازکارافتاده پس از پایان عمر کاری را برای مناطق جهان در بازه‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱. ظرفیت نصب‌شده‌ی انرژی بادی تا پایان ۲۰۲۲ (Delaney et al., 2023)



شکل ۲. مقدار (میلیون تن) پره‌های ازکارافتاده پس از پایان عمر کاری در بازه‌های زمانی مختلف (Delaney et al., 2023)

مدیریت پسماندهای کامپوزیتی، به‌دلیل ساختار مواد کامپوزیتی، دشوارتر و پیچیده‌تر از مدیریت پسماندهای فلزی است. امروزه، چالش ذکرشده درباره‌ی پره‌های کامپوزیتی با طول ۱۵-۲۰ متر است، درحالی‌که در آینده‌ی نزدیک طول پره‌های ازکارافتاده به ۷۵-۸۰ متر می‌رسد (Jensen & Skelton, 2018). در این خصوص، توسعه‌ی روش‌های بازیافت پره‌ها به همراه مدیریت پسماند و جلوگیری از دفن و سوزاندن آن‌ها (متداول‌ترین راهکار امروزی برای چالش ذکرشده) ضروری است، به‌گونه‌ای که شرکت‌های سازنده‌ی پره به اقتصاد چرخشی[2] متعهد هستند و تلاش می‌کنند پره‌ها پس از پایان عمر مجدداً قابل‌استفاده باشند.

نظر به اهمیت و چالش مطرح‌شده، پژوهش حاضر به بررسی فناوری‌های بازیافت پره‌های کامپوزیتی توربین بادی و نحوه‌ی مدیریت پسماند آن‌ها می‌پردازد. به این منظور، در ابتدا سازه‌ی پره‌های کامپوزیتی و مواد تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها معرفی می‌شود. سپس، مدیریت پسماند پره‌ها به همراه روش‌های بازیافت آن‌ها معرفی و مقایسه خواهد شد. در پایان، به جمع‌بندی پژوهش و یافته‌های حاصل از آن پرداخته می‌شود.

۲- معرفی ساختار پره‌ی کامپوزیتی توربین بادی

از صنعت هوانوردی، که نزدیک به نیم قرن جلوتر از صنعت انرژی باد بود، برای انتخاب جنس پره‌ی توربین بادی ایده گرفته شد. در طراحی و ساخت هواپیما از فولاد، آلومینیم، تیتانیم، مواد کامپوزیتی و همچنین چوب استفاده می‌شود. هزینه‌ی بسیار بالای تیتانیم و روش‌های تولید آلومینیم سبب شد که این مواد برای توربین بادی استفاده نشوند. آلومینیم و فولاد مواد دیگری بودند

1. Nacelle
2. Circular economy

که در صنعت انرژی باد استفاده شدند. باوجوداین، مقاومت خستگی پایین در چرخه‌ی کاری سبب شد که استفاده از این دو جنس (آلومینیم و فولاد) به‌تدریج منسوخ شود (Hau, 2006).

برای رفع مشکلات مذکور، مواد کامپوزیت کاربرد گسترده‌ای در پره‌های توربین پیدا کردند، زیرا کاهش قابل‌توجه وزن پره، بارهای گریز از مرکز و بارهای خستگی را به همراه دارند. این کاهش از آنجا ناشی می‌شود که می‌توان آن‌ها را در جهت مورد نظر تقویت کرد و بدین‌ترتیب از تقویت آن‌ها در جهاتی که نیاز به مقاوم‌سازی ندارند جلوگیری کرد.

وزن پره‌ی کامپوزیتی از نمونه‌ی همتای فلزی خود ۲۹ درصد کمتر است و این در حالی است که سازه‌ی کامپوزیتی در برابر بارهای خمشی و پیچشی سفتی و مقاومت بیشتری از نمونه‌ی فلزی دارد و جابه‌جایی نوک آن نیز کمتر است. شایان ذکر است که سازه‌ی کامپوزیتی عمر خستگی طولانی‌تری از فلزات دارد و بسامد طبیعی ارتعاشات آزاد پره‌ی کامپوزیتی کمتر از پره‌ی فلزی است، یعنی برای رساندن پره‌ی کامپوزیتی به حالت تشدید[1] بیشتر از نمونه‌ی فلزی انرژی نیاز است.

اگرچه هزینه‌ی اولیه‌ی تولید مواد کامپوزیتی بیشتر از مواد کنونی است، هزینه‌های سرویس و نگهداری آن کم است. همچنین، دوام بسیار زیاد در مقابل عوامل مخرب محیطی، مقاومت کششی بسیار زیاد، مقاومت مناسب آن در برابر خوردگی و سادگی فرایند ساخت پره‌هایی با هندسه‌ی پیچیده سبب شده است که کامپوزیت‌ها جایگاه ویژه‌ای در صنعت انرژی بادی داشته باشند. استفاده از مواد کامپوزیتی به‌منظور تقویت سازه‌ها، به سبب ضخامت بسیار کم، هیچ تغییری در ابعاد و شکل ظاهری سازه ایجاد نمی‌کند و در هر اندازه، شکل و ابعاد قابل‌اجرا است.

به‌طورکلی، یک ماده‌ی کامپوزیت از یک جزء تقویت‌کننده[2] (به‌عنوان فاز ناپیوسته یا پراکنده) و یک جزء زمینه یا ماتریس[3] (به‌عنوان فاز پیوسته) تشکیل شده است.

در کامپوزیت‌های پایه‌ی پلیمری، ماتریس یا همان زمینه‌ی یک ماده پلیمری است که به آن رزین نیز می‌گویند. رزین شامل دو دسته‌ی کلی ترموست‌ها و ترموپلاست‌ها می‌شود. پلی‌استر، اپوکسی و فنول ازجمله موادی هستند که در ساختمان ماده‌ی کامپوزیتی به‌عنوان ماتریس استفاده می‌شود. شایان ذکر است که رزین واژه‌ای کلی است که به مواد مختلف ارگانیکی که معمولاً ویسکوز، شفاف و یا نیمه‌شفاف[4] هستند اطلاق می‌شود. رزین می‌تواند طبیعی یا سنتزشده باشد. رزین‌های طبیعی از درختان ترشح می‌شوند، درحالی‌که رزین‌های سنتزشده به‌صورت مصنوعی و به کمک فرایندهای شیمیایی ساخته و در کاربردهایی مانند چسب و جلا[5]ی سطوح استفاده می‌شوند. یکی از پرکاربردترین این رزین‌های سنتزی اپوکسی است.

اگرچه خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها به نوع الیاف و رزین و همچنین مقدار و جهت الیاف وابسته است، خواص مکانیکی آن همواره بین خواص مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده‌ی آن است. نوع و مقدار الیاف، اتصال مناسب الیاف و رزین، جهت‌گیری مناسب الیاف، توزیع یکنواخت الیاف در میان ماتریس، پخت مناسب رزین و ضریب انتقال حرارت عواملی هستند که بر ویژگی‌های مکانیکی (مانند مقاومت کششی، برشی و خمشی) تأثیر می‌گذارند. ویژگی‌های ماده‌ای کامپوزیتی مانند اشتعال‌پذیری، مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر خوردگی رابطه‌ی مستقیم با نوع ماده‌ی زمینه‌ی به‌کاررفته دارد. ویژگی‌های فیزیکی رزین‌ها مانند نقطه‌ی ذوب، دمای پخت و گران‌روی نقش مهمی در فرایندپذیری یک کامپوزیت دارند.

شیشه، کربن، بازالت و آرامید از مهم‌ترین الیاف[6] کامپوزیتی هستند که به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شوند.

ماتریس متصل‌کننده‌ی تقویت‌کننده‌ها به یکدیگر است و آن‌ها را کنار یکدیگر در موقعیت ثابت نگه می‌دارد و مانع از حرکت و اعوجاج بین الیاف می‌شود. به عبارت دیگر، ماتریس الیاف را کنار هم نگه می‌دارد و درنتیجه تقویت‌کننده‌ها در برابر آسیب‌های فیزیکی و محیطی مقاوم می‌شوند. درواقع، با توجه به نوع سازه، الیاف یا سایر تقویت‌کننده‌ها در موقعیتی خاص قرار می گیرند و سپس به‌وسیله‌ی ماتریس در جایگاه خود تثبیت می‌شوند. ماتریس می‌تواند انرژی ایجادشده براثر فشار را با تغییر شکل جذب کند. ماتریس استحکام فشاری کامپوزیت را افزایش

1. Resonance
2. Reinforcement
3. Matrix
4. Translucent
5. Varnish
6. Fiber

و به آن چقرمگی[1] می‌دهد، درحالی‌که الیاف استحکام کششی خوبی دارند معمولاً استحکام فشاری مناسبی ندارند. نسبت بالای طول به قطر الیاف سبب ایجاد تنش برشی مؤثری بین این ماده و ماتریس می‌شود و امکان تولید قطعات کامپوزیتی به شکل‌های مختلف را افزایش می‌دهد.

نگهداری الیاف در کنار هم و حفاظت در شرایط محیطی سخت، حفاظت از سایش مکانیکی الیاف، انتقال تنش بین الیاف و جلوگیری از کمانش آن تحت بار فشاری ازجمله مهم‌ترین نقش‌های ماتریس در سازه‌ی کامپوزیتی هستند. درواقع، به کمک ماتریس، خواص فشاری و استحکام برشی کامپوزیت ارتقا می‌یابد. این در حالی است که ماتریس اثر کمی بر خواص کششی کامپوزیت دارد.

کامپوزیت[2] (FRP) (پلاستیک تقویت‌شده با الیاف) با وزن کم و ضخامت ناچیز به‌صورت خارجی بر اجزای سازه مانند تیر و ستون می‌چسبد. یکی از پرکاربردترین کامپوزیت‌ها با زمینه‌ی پلیمری فایبرگلاس[3] نام دارد که ماده‌ی تقویت‌کننده در آن شیشه است. هزینه‌ی کم فایبرگلاس به همراه مقاومت کششی بالای آن سبب شده است که کاربرد گسترده‌ای داشته باشد. در مقایسه با فایبرگلاس، مقدار بالای مدول الاستیسیته، چگالی پایین و مقاومت کششی بالای فیبرهای کربن[4] آن را به‌عنوان یکی از مواد پرکاربرد در صنعت انرژی باد معرفی کرده است. نتایج پژوهشی نشان می‌دهد که بیش از ۸۹ درصد توربین‌های ساخته‌شده در دهه‌ی ۱۹۸۰ از ماده‌ی مرکب الیاف شیشه استفاده کرده‌اند.

شکل ۳ سطح مقطع پره‌ی توربین بادی (ایرفویل) و بخش‌های کامپوزیتی آن را نشان می‌دهد. در یک تقسیم‌بندی کلی، دو نوع کامپوزیت در پوسته‌ی پره[5]/ جان‌های برشی[6] و همچنین اسپار تقویت‌کننده‌ی طولی[7] استفاده می‌شود (شکل ۳). در بخش اسپار تقویت‌کننده‌ی طولی از فیبر کربن/ شیشه تک‌جهته با ماتریس‌هایی مانند اپوکسی و پلی‌استر بهره گرفته می‌شود، درحالی‌که در بخش پوسته‌ی پره/ جان‌های برشی از ساندویچ شیشه‌ی چندجهته، که از چوب درخت بالسا یا فوم[8] (PVC) (به‌عنوان هسته‌ی اصلی در کنار ماتریس‌هایی مانند اپوکسی، پلی‌استر و پلی‌یورتان) ساخته شده‌اند، استفاده می‌شود. در این حالت می‌توان گفت که این بخش از پره‌ها، که از چوب بالسا ساخته شده‌اند، در میان دو قسمت فیبر شیشه قرار گرفته‌اند.

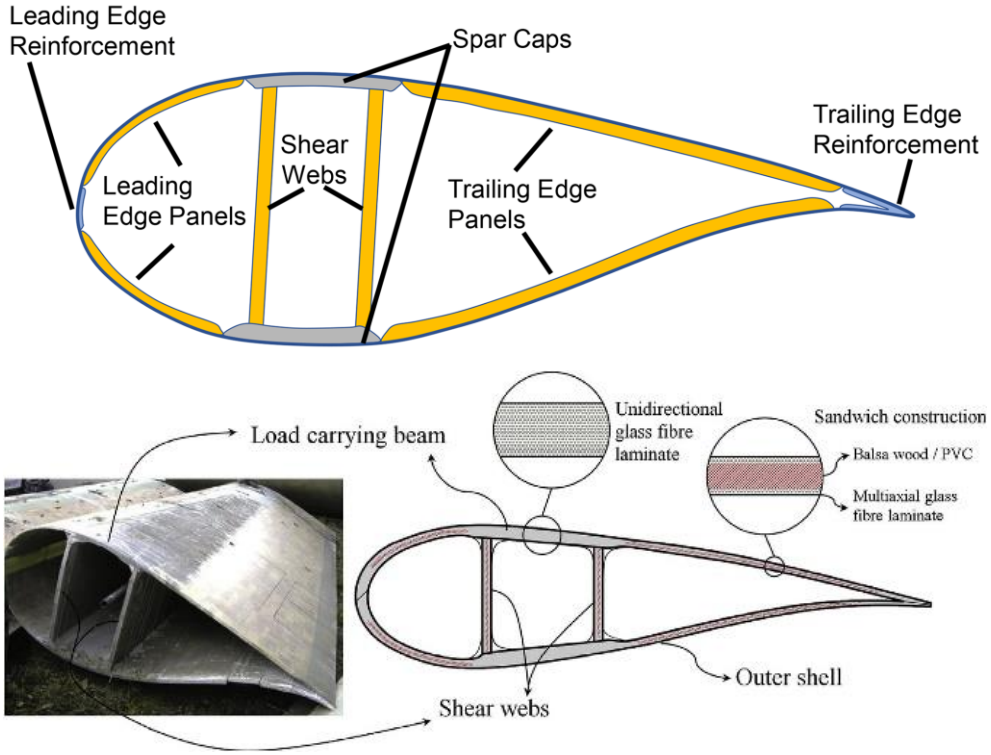
پره‌های کامپوزیتی توربین بادی عموماً به کمک رزین‌های ترموستی ساخته می‌شوند. فرایند ساخت به انرژی و زمان زیادی نیاز دارد و، پس از اتمام عمر کاری، پره‌ها عموماً دفن می‌شوند. بازیافت رزین‌های ترموست به‌راحتی ممکن نیست و پژوهشگران بر رزین‌های ترموپلاستیکی متمرکز شده‌اند، زیرا قابلیت بازیابی و برگرداندن به چرخه را دارند. درواقع، ترموست‌ها برگشت‌پذیر نیستند، اما رزین‌های ترموپلاستیک با افزایش دما ذوب می‌شوند و قابلیت استفاده‌ی مجدد را دارند و می‌توان آن‌ها را دوباره به چرخه‌ی ساخت پره‌های کامپوزیتی آورد که به‌طور ضمنی بیانگر اقتصاد چرخشی است. همچنین، رزین‌های ترموپلاستیک به سازندگان این امکان را می‌دهد که پره‌ها را در محل نصب تولید کنند و چالش مهم امروزی انتقال پره‌های بزرگ را حل کنند.

مقایسه‌ی پره‌های کامپوزیتی ترموپلاستیک با نمونه‌های ترموستی حاکی از مناسب بودن پره‌های ترموپلاستیکی است (Murray et al., 2015; Cousins et al., 2021). مقایسه‌ای تجربی نشان می‌دهد که پره‌های ساخته‌شده با ترموپلاست‌ها بین ۵ تا ۷ برابر از نمونه‌های ترموست در جذب نیروهای وارده مؤثرتر هستند (Murray et al., 2021). درواقع، پره‌های کامپوزیتی ترموپلاستیکی انرژی بیشتری را که از بارگذاری باد بر روی پره ایجاد می‌شود جذب می‌کنند. این انرژی موجب استهلاک و فرسودگی بخش‌های دیگر توربین می‌شود.

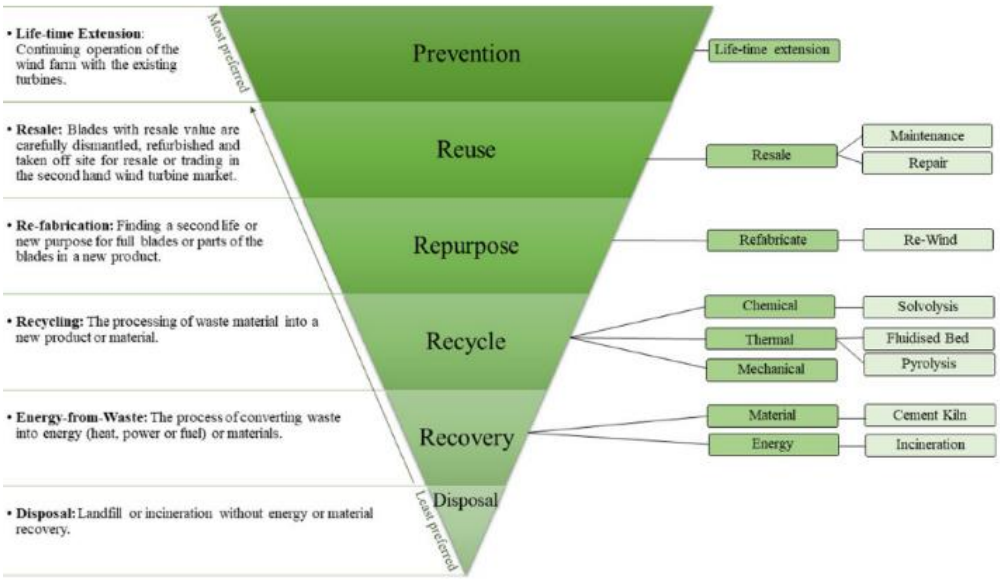
پره‌های توربین‌های فعلی از مواد کامپوزیتی فایبرگلاس و رزین ترموست ساخته شده‌اند. فرایند ساخت این پره‌ها به حرارت زیادی برای پخت رزین نیاز دارد که به هزینه و زمان ساخت می‌افزاید. این در حالی است که رزین‌های ترموپلاست در دمای اتاق پخت می‌شوند و نیروی کاری زیادی نمی‌خواهد که درحال‌حاضر در حدود ۴۰ درصد از هزینه‌ی پره را شامل می‌شود. ضمن اینکه امکان ساخت پره‌های بلندتر با وزن و

1. Toughness
2. Fiber Reinforced Polymer
3. Glass Fiber-Reinforced Polymer (Gfrp)
4. Carbon Fiber-Reinforced Polymers (Cfrp)
5. Shell Panel
6. Shear Web
7. Spar Cap
8. Polyvinyl Chloride (Pvc)

همچنین هزینه‌ی کمتر وجود دارد. برای نمونه، مقایسه‌ی فنی اقتصادی یک توربین بادی کامپوزیتی مگاواتی نشان می‌دهد که ساخت پره به کمک ترموپلاستیک‌ها در مقایسه با ترموست‌ها با کاهشی در حدود ٤/٧ درصد همراه است (Murray et al., 2015).



شکل ۳. هندسه‌ی مقطع پره‌ی توربین بادی (ایرفویل) و مواد به‌کاررفته در آن (Beauson et al., 2016)



شکل ٤. سلسله‌مراتب گزینه‌های مدیریت پسماند پره‌ی کامپوزیتی توربین بادی (Delaney et al., 2021)

۳- مدیریت پسماند پره‌ی توربین بادی

دفع پایدار مواد کامپوزیتی (مانند پره‌های توربین) برای صنایع مرتبط مانند صنعت انرژی بادی کاری دشوار است. این صنعت به یافتن روشی پایدار برای دفع پره‌های از رده خارج با توجه به الزامات محیط زیست، سلامت و ایمنی کارگران، مصرف انرژی و همچنین هزینه‌ی تمام‌شده متعهد است.

براساس سلسله‌مراتب مدیریت پسماند تعریف‌شده توسط اتحادیه‌ی اروپا، مدیریت پسماندهای کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف به شش گروه اجتناب، استفاده‌ی مجدد، تغییر کاربری، بازیافت، بازیابی و دفع به‌ترتیب اولویت طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ٤). برای انتخاب گزینه‌ی مناسب، آگاهی از ساختار پره

و مواد به‌کاررفته در آن ضروری است، زیرا مواد مورد استفاده (مانند رزین‌های ترموست) از سازنده‌ای به سازنده‌ی دیگر متفاوت است (Beauson et al., 2022). همان‌طور که اشاره شد، بیشتر تولیدکنندگان از ماتریس‌های پلیمری ترموست (که عمدتاً با الیاف شیشه ترکیب شده‌اند) استفاده می‌کنند. اگرچه ترموست‌ها به‌راحتی قابل‌بازیافت نیستند، روش‌هایی (مانند دفع و سوزاندن و روش‌های بازیافتی) با رویکرد احیای مواد پس از پایان عمر پره‌ها پیشنهاد شده‌اند که در ادامه معرفی می‌شوند.

استفاده‌ی مجدد:[1] پره‌های توربین را می‌توان به‌عنوان قطعات جایگزین در توربین‌های دیگر استفاده کرد. پس از بازسازی، پره‌های ازکارافتاده قابل‌استفاده هستند و در بازارهای دست دوم به فروش می‌رسند (Leahy, 2019).

تغییر کاربری:[2] استفاده از بخش‌های مختلف پره در کاربردهای گوناگون با ارزش کمتر در مقایسه با نمونه‌ی اولیه را تغییر کاربری پره می‌گویند. بر این اساس، ایده‌های متنوعی ارائه‌شده است. یکی از پتانسیل‌های کاربردی استفاده از پره‌های بلند به‌عنوان بخشی از سازه‌ی پل است (Jensen & Skelton, 2018). از دیگر تغییر کاربری‌های نوآورانه‌ی پره‌های ازکارافتاده می‌توان به خانه‌سازی مقرون‌به‌صرفه (Bank et al., 2018)، خطوط انتقال توان (Alshannaq et al., 2021) کاربرد در زمین بازی، مبلمان شهری، ایستگاه اتوبوس و پارکینگ دوچرخه اشاره کرد (شکل ۵). استفاده به‌عنوان آب‌شکن[3] و همچنین قرارگیری در پلتفرم‌های سازه‌های دریایی (برای نمونه، نگهدارنده‌ی نیروگاه خورشیدی شناور روی آب) از دیگر کاربردهای پره‌ی توربین بادی است. گفتنی است که توخالی بودن پره‌های توربین بادی در شناور بودن آن‌ها بر روی آب مؤثر است.

بازیافت:[4] با وجود اینکه گزینه‌ی بازیافت در رده‌ی چهارم (شکل ٤) سلسله‌مراتب گزینه‌های مدیریت پسماند پره‌ی کامپوزیتی توربین بادی قرار دارد، بیشتر پژوهش‌ها و فعالیت‌های انجام‌شده در مقایسه با گزینه‌های دیگر بر بازیافت متمرکز شده است. روش‌های بازیافت کامپوزیت‌ها به سه دسته‌ی فیزیکی، حرارتی و شیمیایی تقسیم‌بندی شده‌اند که در ادامه معرفی می‌شوند.

شکل ۵. استفاده از پره‌های ازکارافتاده در پارک، پارکینگ دوچرخه و همچنین پل (Joustra et al., 2021)

۳-۱- بازیافت مکانیکی

بازیافت به روش مکانیکی با هدف کاهش اندازه‌ی پسماند کامپوزیتی برای ترکیب مجدد با مواد دیگر انجام می‌شود. بازیافت مکانیکی مبتنی بر روش‌های خُرد کردن و آسیاب کردن است که به تولید ترکیبی از مواد غنی از الیاف و ماتریس پلیمری منجر می‌شود. این ترکیب می‌تواند به‌عنوان تقویت‌کننده و پُرکننده استفاده شود (Fonte & Xydis, 2021). شایان ذکر است که، با توجه به کاربرد نهایی، اندازه‌ی ذرات متفاوت است. همچنین، اگر پره‌ها در حین باز شدن از روی توربین آسیب ببینند (پرتاب شوند یا بر روی زمین کشیده شوند)، بلااستفاده خواهند شد، زیرا قطعات خُردشده از پره دارای ناخالصی هستند و برای بازیافت مستقیم مناسب نخواهند بود (Beauson et al., 2022).

1. Reuse
2. Repurpose
3. Groyne
4. Recycle

اگرچه کاهش طول فیبر استحکام کامپوزیت‌های بازیافتی برای کاربرد مجدد در ساخت پره را کاهش می‌دهد، محصول این بازیافت در تولیداتی با الزامات طراحی آسان‌تر مانند الوار پلاستیکی یا پنل‌های عایق صدا (Broniewicz et al., 2024) به کار می‌روند (Mamanpush et al., 2018).

از مهم‌ترین کاربردهای این نوع بازیافت کاربرد آن‌ها به‌عنوان سوخت برای فرایند تولید سیمان است. در این روش، مواد خام سیمان با فایبرگلاس و فیلرهای پره‌ی کامپوزیتی جایگزین می‌شود. همچنین، بخش ارگانیک پره (مانند چوب درخت بالسا) جایگزین زغال‌سنگ به‌عنوان سوخت می‌شود. از نظر کمّی، در حدود ۹۰ درصد مواد تشکیل‌دهنده‌ی پره به‌طور میانگین در فرایند مذکور قابل‌استفاده است و جایگزین زغال سنگ، شن[1] و کلی[2] می‌شود. درحال‌حاضر، این راهکار در سراسر جهان کاربرد گسترده‌ای ندارد، زیرا مستلزم ایجاد تغییرات و اصلاح در فرایند تولید سیمان و سرمایه‌گذاری قابل‌توجه است. از طرف دیگر، ترکیب مواد پره‌ها باید از قبل شناسایی و براساس نوع رزین دسته‌بندی شود.

در مقایسه با روش‌های سنتی تولید سیمان، بازیافت پره‌ها امکان کاهش ۲۷ درصد در دی‌اکسید کربن و همچنین ۱۳ درصد مصرف آب را دارد (Jacoby, 2022). بدیهی است که، به‌دلیل جلوگیری از مصرف زغال سنگ، این روشِ بازیافت از منظر سلامت، کیفیت اکوسیستم و مصرف منابع اثر مثبتی دارد.

از دیگر روش‌های بازیافت پره‌های توربین بادی استفاده از مواد خُردشده‌ی آن به‌عنوان مواد اولیه‌ی چاپگرهای سه‌بعدی بزرگ است که این روش درحال‌حاضر در دانشگاه مین[3] استفاده می‌شود. از این فناوری می‌توان در صنعت سیمان و تهیه‌ی بتن‌های پیش‌ساخته[4] استفاده کرد. انتظار می‌رود که با استفاده از مواد بازیافت حاصل از پره‌ها و اتوماتیک کردن فرایند ساخت، به کمک چاپگرهای سه‌بعدی، تهیه‌ی این بتن‌ها، که گاهی دارای پیچیدگی‌های هندسی هستند، با کاهش هزینه‌ی محسوسی همراه باشد.

۳-۲- بازیافت حرارتی

پیرولیز[5] و فرایند حرارتی بستر شناور[6] ازجمله روش‌های اصلی بازیافت حرارتی هستند. پیرولیز روشی برای جدا کردن مواد کامپوزیتی تحت دما و فشارهای بالا است. این فرایند شامل حرارت دادن در دمای ۴۵۰-۷۰۰ درجه‌ی سلسیوس و در غیاب اکسیژن به‌منظور تبدیل ماتریس پلیمری به گاز قابل‌احتراق (هیدروکربن‌های گازی)، روغن/ موم، قیر و زغال و استخراج الیاف است (Fonte & Xydis, 2021). شکل ۶ تصویر مقطعی پره‌ی توربین بادی را پیش و پس از این فرایند نشان می‌دهد. استحکام الیاف بازیافت‌شده به این روش نزدیک به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. اگرچه الیاف پیرولیزشده خواص اولیه‌ی خود را تا حدودی حفظ می‌کنند، به‌سبب آلودگی سطحی، پتانسیل آن‌ها برای اتصال به یک ماتریس پلیمری جدید کاهش می‌یابد (Pickering, 2006; Oliveu et al., 2015). شایان ذکر است که ماتریس اپوکسی، براثر سوختن، گازی تولید می‌کند که در دمای ۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس ارزش حرارتی آن به‌دلیل مقدار متان معادل ۴۲ MJ/m^3 است (Cunliffe et al., 2003).

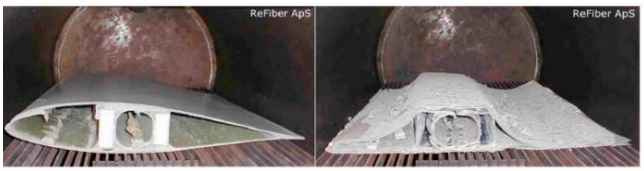
تابش مادون قرمز اغلب سبب کاهش زمان واکنش می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که واکنش پیرولیز مواد کامپوزیتی به کمک تابش مادون قرمز تحت شرایط حرارتی مؤثرتری انجام می‌شود و، به همین دلیل، به انرژی واکنش کمتری نیاز دارد (Liu et al., 2019; Akesson et al., 2012).

فرایند حرارتی بستر شناور برای بازیابی فیبر شیشه و کربن از پسماند کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف به کار می‌رود و بازده آن در بازیابی الیاف از دیگر فرایندهای مشابه بالاتر است. در این فرایند، ماتریس پلیمری ترموست در دمای ۴۵۰-۵۵۰ درجه‌ی سلسیوس از الیاف تقویت‌شده استخراج می‌شود (Arena et al., 2011; Mastellone et al., 2002).

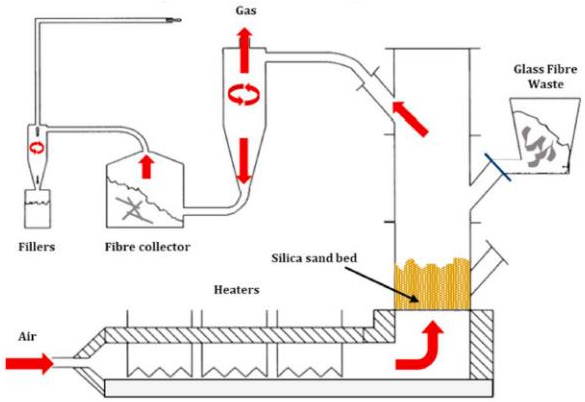
شکل ۷ نحوه‌ی عملکرد فرایند بستر شناور را نشان می‌دهد. در ابتدا، بستر شنی سیلیکا، توسط هوای داغ، گرم و سیال می‌شود. سپس، کامپوزیت‌های خردشده وارد بستر می‌شوند و بخش آلی کامپوزیت توسط هوای داغ تبخیر و توسط جریان هوا و ذرات سیلیکا حمل می‌شود. در این نوع بازیافت حرارتی، ذوب شیشه (بخش رزینی) منبع حرارت و انرژی فرایند (در محدوده دمای ۱۴۰۰-۱۶۰۰ درجه‌ی سلسیوس) و پُرکننده‌ها و

1. Sand
2. Clay
3. Https://Composites.Umaine.Edu/
4. Precast Concrete
5. Pyrolysis
6. Fluidized Bed Process

الیاف مواد بازیافتی به شمار می‌روند. مواد بازیافت‌شده برای تولید کامپوزیت‌های باکیفیت استفاده خواهند شد (Fonte & Xydis, 2021; Rani et al., 2021).



شکل ٦. تصویر مقطعی از پره‌ی کامپوزیتی توربین بادی پیش (چپ) و پس (راست) از پیرولیز



شکل ۷. نحوه‌ی عملکرد فرایند بستر شناور (Kennerley et al., 1998)

۳-۳- بازیافت شیمیایی

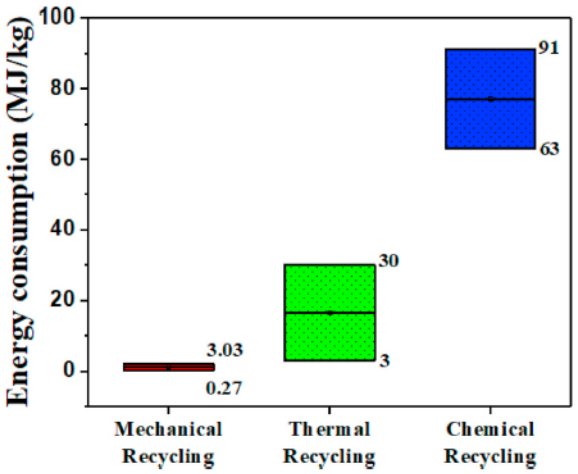
بازیافت شیمیایی به کمک حلال‌ها (تحت دما و فشار معین) برای تجزیه‌ی ماتریس پلیمری و درنتیجه استخراج الیاف و رزین و مواد شیمیایی در فاز مایع انجام می‌شود. از تترالین، سیالات فوق‌بحرانی/ زیربحرانی، نیتریک اسید و آب فوق‌بحرانی/ زیربحرانی به‌عنوان حلال برای تجزیه‌ی ماتریس رزین اپوکسی بهره گرفته می‌شود (Rani et al., 2021). روش بازیافت شیمیایی بیشتر در مقیاس آزمایشگاهی به کار می‌رود و، چنانچه امکان استفاده از این روش در مقیاس صنعتی فراهم شود، برآورد می‌شود آثار منفی زیست‌محیطی ناشی از دفن شدن پسماندهای پره به مقدار ۱۴-۴۴ درصد کاهش خواهد یافت (Liu et al., 2019).

۳-٤- مقایسه‌ی روش‌های بازیافت

در فرایند بازیافت مکانیکی، مواد کامپوزیتی به‌صورت مخلوط همگنی از مواد گرانوله‌شده تولید می‌شوند که این امر استفاده از آن‌ها در کاربردهای جدید را تسهیل می‌کند. همچنین، بازیافت مکانیکی امکان ترکیب پسماندهای پره با دیگر پسماندهای کامپوزیتی را فراهم می‌کند. در سوی مقابل، در طی مراحل پردازش پسماندها به روش مکانیکی گردوغبار زیادی تولید می‌شود که سلامت کارکنان را به خطر می‌اندازد. همچنین، مواد خُردشده ارزش چندانی برای کاربرد در تولید کامپوزیت‌های جدید ندارند.

از مزایای بازیافت حرارتی می‌توان به امکان بازیافت الیاف شیشه و تولید روغن اشاره کرد که به کیفیت مواد اولیه بهشدت وابسته است. در سوی مقابل، در فرایند بازیافت حرارتی پره‌های توربین بادی به مرحله‌ی آماده‌سازی پسماند (شامل برش و خرد کردن) نیاز است که این امر مراحل پردازش را در مقایسه با روش بازیافت مکانیکی افزایش می‌دهد. همچنین، این روش از روش مکانیکی انرژی‌برتر است؛ چراکه تأمین حرارت به انرژی زیادی نیاز دارد. در شکل ۸، میزان «مصرف» انرژی فرایندهای بازیافت مکانیکی، حرارتی و شیمیایی نشان داده شده است. شایان ذکر است که برای «تولید» ۱ کیلوگرم الیاف کربن در حدود ٤۰۰ MJ/kg انرژی نیاز است، درحالی‌که در طی فرایند بازیافت کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن در حدود ۲۰۰ MJ/kg انرژی نیاز است (Rajak et al., 2019).

خاطرنشان می‌شود که الیاف بازیافتی به کمک روش حرارتی به پردازش اضافی (برای آماده‌سازی مواد به‌منظور ساخت یا بازیابی استحکام الیاف) نیاز دارند. درنتیجه، الیاف بازیافت‌شده به‌طور قابل‌توجهی گران‌تر از الیاف تازه هستند و یافتن کاربرد مناسب برای آن‌ها دشوار است.



شکل ۸. انرژی موردنیاز برای روش‌های مختلف بازیافت الیاف از پسماندهای کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف (Ateeq, 2023)

به کمک روش بازیافت شیمیایی، امکان بازیابی الیاف تمیز شیشه و مواد ماتریس به شکل مایع وجود دارد. در روشی مشابه با بازیافت حرارتی، الیاف بازیافت‌شده از الیاف بکر شکننده‌تر

هستند و خواص مکانیکی کمتری دارند که این ویژگی‌ها کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. همچنین، برای بازیافت شیمیایی به مرحله‌ی بازیافت مکانیکی (خُرد کردن پره) نیاز است. از سوی دیگر، استفاده از حلال‌های شیمیایی هزینه‌بر است، امکان سمیت و انتشار حلال در محیط وجود دارد و بازیافت حلال خود از چالش‌هایی است که به تحقیق و بررسی بیشتر نیاز دارد. به‌طورکلی، به‌دلیل دما و فشار موردنیاز برای واکنش، استفاده از حلال و کیفیت پایین الیاف شیشه‌ی بازیافت‌شده، روش بازیافت شیمیایی برای ترموست‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه مقرون‌به‌صرفه نیست (Beauson et al., 2022).

٤- دفع و سوزاندن

دفن کردن و سوزاندن، که در سلسله‌مراتب مدیریت پسماند کمترین اولویت را دارد (شکل ٤)، از لحاظ زیست‌محیطی نامطلوب هستند و درحال‌حاضر رایج‌ترین روش برای دفع پره‌های ازکارافتاده به شمار می‌روند (Delaney et al., 2021). شکل ۹ تصویری از دفن پره‌ها را نشان می‌دهد.

پره‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که در برابر بادهای شدید و شرایط آب‌وهوایی سخت مقاومت کنند. درنتیجه، در مقابل فرایندهای مکانیکی فشرده‌سازی زباله یا فرایندهای تجزیه‌ی طبیعی سرسخت هستند (Ramirez-Tejeda et al., 2017). این امر به ممنوعیت دفن پسماندهای پره در چندین کشور اروپایی مانند آلمان، اتریش و فنلاند و افزایش هزینه‌های دفن زباله در کشورهای دیگر منجر شده است، ضمن اینکه با افزایش اندازه‌ی پره‌ها امکان دفن آن‌ها در سایت‌های فعلی با چالش همراه است.

سوزاندن پره‌ها حجم زباله را کاهش می‌دهد و امکان بازیابی انرژی از احتراق رزین و چوب را فراهم می‌کند. باوجوداین، الیاف شیشه غیرقابل‌احتراق هستند و ارزش حرارتی پسماندهای کامپوزیتی را کاهش می‌دهند (Pickering, 2006). انتشارهای حاصل از احتراق رزین‌های اپوکسی ممکن است حاوی ترکیبات جانبی مضر (مانند فرمالدهید[1] و مونوکسید کربن) باشند (Ramirez-Tejeda et al., 2017). شایان ذکر است که، در پایان فرایند، ٦٠ درصد مواد به‌صورت خاکستر باقی می‌مانند که یا دفن می‌شوند و یا می‌توانند در مصالح ساختمانی استفاده شوند (Jensen & Skelton, 2018).

شکل ۹. دفن پره‌ها پس از پایان عمر کاری (Jacoby, 2022)

۵- نتیجه‌گیری

انرژی بادی نقش مهمی در گذار انرژی از منابع فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. کشورهای مختلفی در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ به نصب توربین‌های بادی پرداختند و برنامه‌هایی بلندمدت برای بهره‌گیری از انرژی بادی دارند. با توجه به عمر کاری توربین‌ها (۲۰ تا ۳۰ سال) و تعداد رو به افزایش آن‌ها، موضوع مدیریت پسماند اجزای این توربین‌ها به‌ویژه پره‌ها، که اکثراً از جنس کامپوزیت‌های برپایه‌ی الیاف فایبرگلاس هستند، به مسئله‌ای مهم و دشوار بدل شده است. پژوهش حاضر ضمن معرفی سلسله‌مراتب مدیریت پسماند شامل شش گروه اجتناب، استفاده‌ی مجدد، تغییر کاربری، بازیافت، بازیابی و دفع به بررسی فناوری‌های بازیافت مکانیکی، حرارتی و شیمیایی و مقایسه‌ی آن‌ها پرداخت. به‌منظور یافتن راه‌حل موفق، پایدار و اقتصادی (برای بازیافت پره‌های کامپوزیتی) ضروری است مواد کامپوزیتی پره در چرخه‌ی تولید پره‌های جدید قرار گیرند که بیانگر اقتصاد چرخشی است. به این منظور، پژوهشگران بر روش بازیافت شیمیایی متمرکز شده‌اند. با وجود گزینه‌های مطرح‌شده، مدیریت پسماند پره‌های کامپوزیتی به موارد اشاره‌شده محدود نیست و امروزه دائماً ایده‌های جدیدی برای بهره‌گیری از این پره‌ها مطرح می‌شوند.

٦- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از پژوهشگاه مواد و انرژی بابت در اختیار قرار دادن منابع علمی مورد استفاده در این پژوهش کمال قدردانی و سپاس را دارند.

1. Formaldehyde

مراجع

1. Akesson, D., Foltynowicz, Z., Christeen, J., & Skrifvars, M. (2012). Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *31*(17), 1136-1142. https://doi.org/10.1177/0731684412453512
2. Alshannaq, A. A., Bank, L. C., Scott, D. W., & Gentry, R. (2021). A decommissioned wind blade as a second-life construction material for a transmission pole. *Construction Materials*, *1*(2), 95-104. https://doi.org/10.3390/constrmater1020007
3. Arena, U., Di Gregorio, F., Amorese, C., & Mastellone, M. L. (2011). A techno-economic comparison of fluidized bed gasification of two mixed plastic wastes. *Waste Management*, *31*(7), 1494-1504. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.02.004
4. Ateeq, M. (2023). A review on recycling technique and remanufacturing of the carbon fiber from the carbon fiber polymer composite: Processing, challenges, and state-of-arts. *Composites Part C: Open Access*, 100412. https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100412
5. Bank, L. C., Arias, F. R., Yazdanbakhsh, A., Gentry, T. R., Al-Haddad, T., Chen, J. F., & Morrow, R. (2018). Concepts for reusing composite materials from decommissioned wind turbine blades in affordable housing. *Recycling*, *3*(1), 3. https://doi.org/10.3390/recycling3010003
6. Beauson, J., Madsen, B., Toncelli, C., Brøndsted, P., Ilsted Bech, J. (2016). Recycling of shredded composites from wind turbine blades in new thermoset polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *90*, 390-399. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.07.009
7. Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D. P., & Jensen, J. P. (2022). The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *155*, 111847. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111847
8. Broniewicz, M., Halicka, A., Buda-Ożóg, L., Broniewicz, F., Nykiel, D., & Jabłoński, Ł. (2024). The Use of Wind Turbine Blades to Build Road Noise Barriers as an Example of a Circular Economy Model. *Materials*, *17*(9), 2048. https://doi.org/10.3390/ma17092048
9. Cooperman, A., Eberle, A., & Lantz, E. (2021). Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options. *Resources, Conservation and Recycling*, *168*, 105439. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105439
10. Cousins, D. S., Suzuki, Y., Murray, R. E., Samaniuk, J. R., & Stebner, A. P. (2019). Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades. *Journal of cleaner production*, *209*, 1252-1263. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.286
11. Cunliffe, A. M., Jones, N., & Williams, P. T. (2003). Pyrolysis of composite plastic waste. *Environmental technology*, *24*(5), 653-663. https://doi.org/10.1080/09593330309385599
12. Delaney, E. L., McKinley, J. M., Megarry, W., Graham, C., Leahy, P. G., Bank, L. C., & Gentry, R. (2021). An integrated geospatial approach for repurposing wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling*, *170*, 105601. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105601
13. Delaney, E. L., Leahy, P. G., McKinley, J. M., Gentry, T. R., Nagle, A. J., Elberling, J., & Bank, L. C. (2023). Sustainability Implications of Current Approaches to End-of-Life of Wind Turbine Blades—A Review. *Sustainability*, *15*(16), 12557. https://doi.org/10.3390/su151612557
14. Fonte, R., & Xydis, G. (2021). Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. *Journal of environmental management*, *287*, 112269. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112269
15. Jacoby, M. (2022). Recycling wind turbine blades. *Chem. Eng. News*, *100*(27), 26–30. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cen-10027-cover
16. Jensen, J. P., & Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *97*, 165-176. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041
17. Joustra, J., Flipsen, B., & Balkenende, R. (2021). Structural reuse of high-end composite products: A design case study on wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling*, *167*, 105393. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105393
18. Hau, E., & Renouard, H. (2006). Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics (Vol. 2). Berlin: springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-27151-9
19. Kennerley, J. R., Kelly, R. M., Fenwick, N. J., Pickering, S. J., & Rudd, C. D. (1998). The characterisation and reuse of glass fibres recycled from scrap composites by the action of a fluidised bed process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *29*(7), 839-845. https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00008-6
20. Leahy, P. G. (2019). End-of-life options for composite material wind turbine blades: recover, repurpose or reuse. In Proceedings of the 14th SWEDES Conference, Dubrovnik, Croatia (pp. 1-6). https://www.re-wind.info/s/Leahy_ReWind_Paper2019_v4.pdf
21. Liu, P., & Barlow, C. Y. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, *62*, 229-240. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007
22. Liu, P., Meng, F., & Barlow, C. Y. (2019). Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison. *Journal of Cleaner Production*, *212*, 1268-1281. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.043
23. Mastellone, M. L., Perugini, F., Ponte, M., & Arena, U. (2002). Fluidized bed pyrolysis of a recycled polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, *76*(3), 479-487. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00052-6
24. Mamanpush, S. H., Li, H., Englund, K., & Tabatabaei, A. T. (2018). Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites. *Waste Management*, *76*, 708-714. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.050
25. Murray, R. E., Jenne, S., Snowberg, D., Berry, D., & Cousins, D. (2019). Techno-economic analysis of a megawatt-scale thermoplastic resin wind turbine blade. *Renewable Energy*, *131*, 111-119. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.032
26. Murray, R. E., Beach, R., Barnes, D., Snowberg, D., Berry, D., Rooney, S., ... & Hughes, S. (2021). Structural validation of a thermoplastic composite wind turbine blade with comparison to a thermoset composite blade. *Renewable Energy*, *164*, 1100-1107. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.040
27. Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in materials science*, *72*, 61-99. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004
28. Ortegon, K., Nies, L. F., & Sutherland, J. W. (2013). Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, *39*, 191-199. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.022
29. Pickering, S. J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, *37*(8), 1206-1215. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.030
30. Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Linul, E. (2019). Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. *Polymers*, *11*(10), 1667. https://doi.org/10.3390/polym11101667
31. Ramirez-Tejeda, K., Turcotte, D. A., & Pike, S. (2017). Unsustainable wind turbine blade disposal practices in the United States: A case for policy intervention and technological innovation. *NEW SOLUTIONS: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, *26*(4), 581-598. https://doi.org/10.1177/1048291116676098
32. Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., & Zafar, S. (2021). A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades. *Composites part B: engineering*, *215*, 108768. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108768