

~95% kompozytów epoksydowych trafia na składowiska odpadów

73% konsumentów jest gotowych zapłacić wyższą cenę za materiały ekologiczne

41% materiałów biosurowych pochodzi z odpadów biomasy

Wpływ kompozytowych nosków ochronnych na środowisko

Niniejszy dokument ocenia materiały kompozytowych nosków ochronnych nie pod kątem biodegradowalności, lecz pochodzenia węgla, zużycia energii w procesie, możliwości recyklingu oraz odporności regulacyjnej.

Polityka środowiskowa Europy zakłada osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2035 roku, kładąc nacisk na energię odnawialną, ograniczenie odpadów, recykling oraz wykorzystanie materiałów poprzez ścisłe regulacje i zobowiązania redukcji emisji.

Zazwyczaj noski ochronne są wykonane z włókna szklanego wzmocnionego żywicą epoksydową. Kompozyty te stanowią problem recyklingowy, nieulegają biodegradacji i wiążą się z wysokim zużyciem energii oraz znacznymi emisjami dwutlenku węgla.

Aby sprostać tym ograniczeniom, wprowadziliśmy **Bio-Toe** - noski wykonane z poliamidowej formuły zawierającej **41% nylonu biosurowego** pochodzącego z biomasy nienadającej się do spożycia, Bio-Toe oferuje niższe emisje węgla, możliwość recyklingu mechanicznego oraz potencjał osiągnięcia ujemnego bilansu węglowego w określonych warunkach produkcji i recyklingu.



Najczęściej stosowane obecnie kompozyty na bazie żywic epoksydowych obejmują:

- włókno szklane
- włókno węglowe

Innowacyjne materiały Kessin:

- mieszaniny polimerów biosurowych PA56

Wyzwania środowiskowe kompozytów na bazie żywic epoksydowych.

Trudności w recyklingu i obiegu zamkniętym.

Żyvice epoksydowe stosowane w tradycyjnych kompozytach z włókna szklanego i węglowego po utwardzeniu tworzą nieodwracalne struktury termoutwardzalne. Te usieciowane struktury nie mogą być topione ani ponownie formowane jak tworzywa termoplastyczne. Większość kompozytów epoksydowych po zakończeniu cyklu życia trafia na składowiska odpadów lub do spalarni, ponieważ konwencjonalne metody recyklingu nie pozwalają na ekonomicznie opłacalny odzysk materiałów.

Recykling mechaniczny (np. rozdrabnianie na wypełniacz) prowadzi do znacznej degradacji właściwości mechanicznych, co oznacza, że materiał z recyklingu często ma ograniczoną wartość ponownego wykorzystania.

Technologie recyklingu chemicznego istnieją na etapie badań, jednak obecnie są energochłonne, kosztowne i nie są szeroko wdrażane w praktyce przemysłowej.

Ślad produkcyjny i emisje lotnych związków organicznych (LZO)

Produkcja włókna szklanego i żywicy epoksydowej to procesy energochłonne, wymagające wysokich temperatur i surowców petrochemicznych. W szczególności produkcja żywicy może powodować emisję lotnych związków organicznych (LZO) oraz gazów cieplarnianych.

Przekłada się to na wysoką łączną emisję środowiskową - od produkcji po utylizację.

Kompozyty z włókna szklanego nie są biodegradowalne i mogą utrzymywać się na wysypiskach przez stulecia. Oddzielenie włókna szklanego od żywicy jest technicznie możliwe, ale kosztowne i energochłonne.

Środowiskowe cechy nylonu PA56 na bazie biologicznej

PA56 na bazie biologicznej zawiera węgiel pochodzący ze źródeł odnawialnej biomasy. Oznacza to, że część emisji związanych z tym polimerem pochodzi z CO₂ wcześniej pochłoniętego z atmosfery, a nie z paliw kopalnych - co redukuje emisje gazów cieplarnianych w cyklu cradle-to-gate w porównaniu z polimerami w pełni petrochemicznymi.

W przeciwieństwie do epoksydów termoutwardzalnych, PA56, może być ponownie przetwarzane i formowane pod koniec życia produktu, wspierając cyrkularność materiałową bez dużej degradacji właściwości jak w przypadku kompozytów epoksydowych.

To termoplastyczne zachowanie daje PA56 wyraźną przewagę środowiskową w porównaniu z żywicami epoksydowymi, które obecnie nie mają praktycznej, przemysłowej metody recyklingu.

Badania wskazują, że włókna poliamidowe na bazie biologicznej (takie jak PA56) wykazują znaczną biodegradowalność w określonych warunkach, podczas gdy wiele polimerów pochodzenia petrochemicznego utrzymuje się w środowisku znacznie dłużej.

Tabela 1 – Możliwości odzysku kompozytowych nosków epoksydowych po zakończeniu cyklu życia
Porównanie odzysku masy epoksydowej i włókien, skalowalności oraz dojrzałości przemysłowej

Metoda	Czy odzyskuje żywicę epoksydową?	Czy odzyskuje włókna?	Skalowalność?	Uwagi
Chemiczna	X (żywica ulega degradacji)	✓ (wymaga ponownego "sizingu")	! (droga, toksyczna)	Stosowana w laboratoriach/ instalacjach pilotażowych; wymaga rozpuszczalników i generuje odpady chemiczne.
Termiczna	X (żywica ulega spaleni)	! (włókna osłabione)	✓ (przemysłowa)	Stosowana w piecach cementowych; odzysk energii, ale jakość włókien jest obniżona.
Mielenie Mechaniczne	X (żywica jest tracona)	X (włókna rozdrobnione)	✓	Tania, ale przekształca materiał w wypełniacz o niskiej wartości; nie odzyskuje nienaruszonych włókien.

Tabela 2 – Porównanie wydajności recyklingu i wpływu na środowisko: PA56 biosurowy vs kompozyt epoksydowy w podnoskach

Wydajność odzysku materiału, zapotrzebowanie energetyczne, koszt, zachowanie jakości i potencjał w obiegu zamkniętym

Kryterium / Parametr	41% bio-PA56 / 59% petro-PA (Osłona termoplastyczna)	Osłona z kompozytu termoutwardzalnego na bazie żywicy epoksydowej
Rodzina polimerowa	Pojedyncza rodzina polimerowa (PA)	Usieciowany kompozyt epoksydowy + mata z włókna szklanego/węglowego
Główna ścieżka recyklingu	Rozdrobnienie → Ponowne stopienie → Formowanie wtryskowe nowych osłon (obiegu zamkniętego)	Odzyskane są tylko włókna
Typowa wydajność odzysku	80–90% masy polimeru ponownie wykorzystanej w częściach tej samej jakości	50–60% masy włókna; 0% matrycy epoksydowej
Zapotrzebowanie na energię na kg odzyskanego	≈ 15 MJ (ponowne stopienie)	35–55 MJ (solwoliza / piroliza)
Utrata jakości po 1 cyklu	< 10% w udarności Izod	Włókna wymagają ponownego nakładania środka wiążącego ("sizing")
Liczba cykli wysokowartościowych	5–7 razy (dane branżowe dla PA)	1 raz (włókna wymagają ponownego przygotowania)
Opcja down-cyclingu	PA → klipsy samochodowe, opaski kablowe	Zmielona żywica epoksydowa → wypełniacz do betonu / asfaltu
Wrażliwość na zanieczyszczenia	Niska – filtracja w stanie stopionym usuwa pigmenty i zanieczyszczenia	Wysoka – konieczność oddzielenia żywicy, włókna, ewentualnych metali
Wymagana infrastruktura	Standardowe linie do recyklingu PA (dostępne na całym świecie)	Wyspecjalizowane zakłady przetwarzania termoutwardzalnych (< 10 na świecie)
Koszt odzysku	Okolo 0.3 €/kg (mieszanie + energia)	1.5–3 €/kg (chemikalia + wysoka temperatura)
Kredyt środowiskowy (GWP)	Okolo –1.8 kg CO ₂ -ekw./kg w porównaniu z pierwotnym PA	Okolo –0.4 kg CO ₂ -ekw./kg (tylko dla odzyskanych włókien)

Tabela 3 – Funkcjonalne i środowiskowe zalety PA56 biosurowego w zastosowaniach podnosków ochronnych

Implikacje dla śladu gazów cieplarnianych, zużycia energii w procesie, bezpieczeństwa pracowników i zgodności regulacyjnej

Zalety noska ochronnego z bio-PA56	Dlaczego ma to znaczenie, nawet jeśli trwałość na składowisku jest taka sama
Około 40% mniej węgla kopalnego w granulacie	Bezpośrednie obniżenie śladu gazów cieplarnianych samej żywicy
Surowiec odnawialny	Ochrona marki przed zmiennością cen ropy oraz presją raportowania Scope 3
Cykl formowania wtryskowego ok. 65 sekund vs 30 minut utwardzania epoksydu	9x niższe zużycie energii w etapie formowania; największy czynnik różnicy w GWP
Możliwość ponownego przetapiania (termoplast)	Możliwy recykling mechaniczny; epoksyd jest nieodwracalnie usieciowany
Brak emisji styrenu / aminowych LZO podczas przetwarzania	Lepsze wyniki w zakresie jakości powietrza w pomieszczeniach i narażenia pracowników
Spełnia nadchodzące wymogi dotyczące zawartości bio (UE, USA – poziom federalny)	Zabezpiecza produkt na przyszłość przed opłatami w ramach rozszerzonej odpowiedzialności producenta (EPR)

Tabela 4 – Wskaźnikowe zużycie energii pierwotnej dla materiałów na podnoski (od źródła do wyrobu gotowego)

Wartości przedstawiają typowe zakresy przemysłowe dla produkcji materiałów pierwotnych; rzeczywiste wartości zależą od dostawcy, lokalizacji geograficznej i miks energetycznego. Wartości te służą do celów porównawczych, a nie do dokładnej analizy LCA na poziomie produktu.

Kategoria materiału	Typowy materiał stosowany w noskach	Pierwotne zapotrzebowanie na energię (MJ/kg)	Główne czynniki zużycia energii	Uwagi dot. zastosowania w obuwu
Włókno szklane	Szkło E + epoksyd	45–65 (włókno szklane) + 70–90 (żywica epoksydowa)	Topienie włókien (~1500 °C), synteza żywicy petrochemicznej	Matryca epoksydowa uniemożliwia recykling w obiegu zamkniętym
Włókno węglowe	CF na bazie PAN + epoksyd	250–300 (włókno węglowe) + 70–90 (żywica epoksydowa)	Stabilizacja PAN i karbonizacja	Najwyższa energia wbudowana; ograniczone możliwości ponownego użycia
Materiał bio-pochodny	PA56 (41% bio-pochodny)	60–80	Fermentacja + polimeryzacja	Niższy udział energii kopalnej; możliwość recyklingu termoplastycznego

Tabela 5 — Porównanie możliwości odzysku

Kryterium	Kompozyt epoksydowy	Metale	Bio-PA56
Recykling w obiegu zamkniętym	Nie	Rzadko	Tak
Wielokrotne użycie (wiele cykli)	Nie	Ograniczone	Tak (5–7×)
Infrastruktura	Specjalistyczna	Przemysł ciężki	Istniejące linie PA
Zachowanie wartości	Niskie	Średnie	Wysokie

Możliwość odzysku materiału i wydajność w cyrkulacji:

- **Noski ochronne z PA56 na bazie biologicznej**

Materiał PA56 na bazie biologicznej umożliwia recykling mechaniczny z wysokim odzyskiem materiału, zazwyczaj odzyskując ponad 80% masy polimeru, wspierając recykling wielokrotny (5–7 cykli) przy ograniczonej degradacji właściwości mechanicznych.

Recykling jest ekonomicznie opłacalny (przy użyciu standardowych linii do recyklingu poliamidu dostępnych globalnie) przy zachowaniu wysokiej wartości materiału. Komponenty poddane recyklingowi mogą być ponownie wykorzystane w obuwiu ochronnym lub zredukowane do zastosowań przemysłowych o niższym poziomie.

- **Noski ochronne kompozytowe na bazie epoksydowej**

Tylko włókna wzmacniające mogą być częściowo odzyskane, zazwyczaj tylko raz, z istotną utratą wytrzymałości. Sama matryca epoksydowa nie podlega odzyskowi i jest niszczone podczas recyklingu.

Procesy recyklingu wymagają dużego zużycia energii, specjalistycznej infrastruktury i obsługi chemicznej, co skutkuje wysokimi kosztami i ograniczoną skalowalnością.

Ogólna cyrkularność jest niska, a większość materiału ostatecznie trafia na wysypiska.

- **Aspekty zdrowotne, bezpieczeństwa i regulacyjne**

Główne ryzyko zawodowe w systemach epoksydowych występuje podczas produkcji i napraw, wymagając ścisłego stosowania środków ochrony osobistej, wentylacji i kontroli ekspozycji.

Duża część produkcji nosków ochronnych epoksydowych odbywa się poza UE, gdzie egzekwowanie przepisów i standardy zawodowe są różne, a produkty nadal podlegają ograniczeniom rynku UE. Trwające zmiany regulacyjne w UE mogą dodatkowo ograniczać niektóre chemikalia epoksydowe, zwiększając długoterminowe ryzyko dla komponentów obuwi epoksydowego.

Główne ustalenia i obserwacje

- **Kontekst rynkowy i regulacyjny**

Okolo 73% konsumentów jest sklonnych zaplacic wyzsza cene za materialy zrównowazone, co wskazuje na rosnacy popyt na obuwie ochronne o niskim wpływie na środowisko.

Mapa drogowa regulacji UE (od 2026 r.) nadal zaostrza ograniczenia dotyczące substancji niebezpiecznych, w tym niektórych utwardzaczy epoksydowych i chemikaliów klasyfikowanych jako CMR, zwiększając długoterminowe ryzyko zgodności dla systemów opartych na epoksydach.

- **Ograniczenia w końcowej fazie życia kompozytów epoksydowych**

Okolo 95% produktów kompozytowych na bazie epoksydów trafia obecnie na składowiska lub do spalania.

Zaawansowane metody recyklingu istnieją na poziomie laboratoryjnym lub pilotażowym, ale pozostają energochłonne, kosztowne i nieekonomiczne dla przemysłu obuwniczego. W praktyce recykling komponentów epoksydowych (włókno węglowe, włókno szklane) ma minimalny pozytywny wpływ środowiskowy na skalę przemysłową.

- **Złożoność systemowa nosków ochronnych epoksydowych**

Żywice epoksydowe są zwykle stosowane w połączeniu z włóknami szklanymi lub węglowymi, tworząc struktury wielomateriałowe. Nawet przy użyciu wariantów „bio-epoksydowych” sama struktura kompozytu uniemożliwia efektywne rozdzielanie i odzysk, co czyni recykling zamkniętego obiegu mało praktycznym w zastosowaniach obuwniczych.

- **Przewaga środowiskowa nosków ochronnych z PA56 na bazie biologicznej**

Noski ochronne z PA56 na bazie biologicznej zawierają 41% polimeru pochodzącego z odpadów biomasy, zmniejszając zależność od węgla kopalnego i, w przeciwieństwie do kompozytów epoksydowych, składają się z jednej rodziny polimerów termoplastycznych, co znacznie redukuje złożoność demontażu i recyklingu.

Istniejąca infrastruktura do recyklingu poliamidów umożliwia praktyczny recykling zamkniętego obiegu w przemyśle obuwniczym i pokrewnych branżach.

- **Wyjaśnienie dotyczące biodegradowalności**

PA56 na bazie biologicznej nie jest biodegradowalny w warunkach rzeczywistego utylizowania.

Przewaga środowiskowa w porównaniu z kompozytami epoksydowymi nie wynika więc z degradacji na wysypisku, lecz z pochodzenia węgla, zużycia energii w procesie, bezpieczeństwa pracowników, możliwości recyklingu i odporności na regulacje.

Kluczowe wnioski

Przy ocenie obejmującej ślad węglowy, energochłonność procesu, bezpieczeństwo pracowników, odporność regulacyjną, właściwości mechaniczne oraz możliwość odzysku po zakończeniu cyklu życia, noski ochronne wykonane z bio-bazowanego PA56 oferują obecnie najbardziej korzystny kompromis spośród dostępnych komercyjnie materiałów na noski, bez uszczerbku dla certyfikowanych parametrów bezpieczeństwa.

Noski ochronne z bio-PA56 optymalizują stosunek poziomu ochrony do wpływu środowiskowego, łącząc certyfikowaną wytrzymałość mechaniczną z ograniczonym udziałem węgla kopalnego, niższym zapotrzebowaniem energetycznym w produkcji, poprawą bezpieczeństwa pracy podczas przetwórstwa oraz praktyczną możliwością recyklingu w obiegu zamkniętym – zaletami, których systemy metalowe oraz kompozyty na bazie żywic epoksydowych nie zapewniają jednocześnie.



<https://www.kessin.eu>

contact@kessin.eu

+49 (0) 151 262 35 428

Berlin, Germany, 11 Grudzień 2025

Sources:

<https://eureka.patsnap.com/report-how-recyclable-epoxy-composites-are-redefining-material-science>

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10889868.2025.2565253?af=R>

<https://www.vertecbiosolvents.com/traditional-vs-bio-based-resin-comparing-the-alternatives>

https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2003/87-7972-683-6/html/helepubl_eng.htm

<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.iecr.4c03321>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-09240-x>