



Niniejsza rozprawa powstała w wyniku realizacji jednego z zadań projektu pn. „Doktorat Wdrożeniowy” - II edycja, finansowanego ze środków budżetu Państwa. Id projektu: 410487, nr rej.: 0062/DW/2018. Dofinansowanie projektu 1 875 720 zł. Całkowita wartość projektu 1 875 720 zł.



**Politechnika  
Śląska**

**Dyscyplina Naukowa  
Inżynieria Lądowa, Geodezja i  
Transport**

# **ROZPRAWA DOKTORSKA**

mgr inż. Anna Butor

## **Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC**

Analysis of the feasibility of recycling materials used for newly developed polymer railway sleepers based on LCC

Promotor

dr hab. inż. Krzysztof Labisz, prof. PŚ

Opiekun pomocniczy ze strony Przedsiębiorstwa

dr inż. Rafał Wachnik

Katowice, marzec 2023 r.

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

*„Per aspera ad astra”*

*promotorowi*

***dr hab. inż. Krzysztofowi Labisz, prof. PŚ***  
*za cierpliwość, zaufanie i wkład w całość poniższej pracy,  
promotorowi pomocniczemu z ramienia Przedsiębiorstwa*

***dr inż. Rafałowi Wachnik***

*za nieocenioną pomoc udzieloną w trakcie przygotowywania pracy,*

***Rodzinie i partnerowi***  
*za wsparcie i wiarę w każdym momencie*

***Dziękuję serdecznie***

## **Streszczenie**

Koncepcja pracy dotyczy zbadania możliwości zastosowania innowacyjnych podkładów polimerowych w Polsce mając na uwadze koszty w cyklu życia produktu co może przekładać się na efektywność ekonomiczną i wpływać pozytywnie na środowisko przy zachowaniu parametrów technicznych toru. Praca została napisana na potrzeby firmy DB Cargo Polska oraz spółki Infra Silesia S.A., której DB Cargo Polska jest 100% udziałowcem.

Świadome przedsiębiorstwa stawiają w dzisiejszych czasach duży nacisk na rozwój, poprawę dbałości o środowisko, poprawę bezpieczeństwa przy zachowaniu racjonalności kosztowej i ekonomicznej.

Niniejsza rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów. Po rozdziale „Przedstawienia istoty zagadnienia” przedstawiono rozdział „Przeгляд literatury”, w którym zgłębiono część teoretyczną zagadnienia.

W części teoretycznej przedstawiono obecnie stosowane rozwiązania w zakresie podkładów kolejowych w Polsce, jak również rozwiązania stosowane na arenie międzynarodowej. Przeanalizowano prawne możliwości zastosowania innowacyjnych podkładów kolejowych w Polsce wskazując na warunki ich wdrożenia i zastosowania w Polsce. W tym celu przeanalizowano literaturę prawa polskiego i zagranicznego. Bardzo ważną rolę we wdrożeniu innowacyjnego rozwiązania w przedsiębiorstwie, które dotyka obszaru rynkowego odgrywa aspekt ekonomiczny. W niniejszej pracy zbadano wpływ również podkładów polimerowych na ekonomie. W części teoretycznej opisano metody analizy LCC i wybrano jedną, która w późniejszym etapie pracy doktorskiej została użyta w celu obliczenia kosztów 1km toru na podkładach tradycyjnych vs. innowacyjnych. Ukazanie celowości poszukiwania nowych innowacyjnych rozwiązań znalazło swoje miejsce również w rozdziale poświęconym aspektom środowiskowym. Ten rozdział wskazuje jak wielką rolę odgrywają rozporządzenia polskie jak również dyrektywy europejskie na codzienne działania podejmowane w firmie. Aby im sprostać w przyszłości i móc dostosować firmę do najnowszych standardów ekologicznych ważne jest, aby strategicznie planować działalność firmy z uwzględnieniem dbałości o środowisko.

Kolejne rozdziały stanowią przedstawienie zrealizowanych prac badawczych przybliżających do realizacji celu pracy i udowodnienia postawionej w niej tezy. Część badawcza składa się z badań próbek podkładów polimerowych pozyskanych od dwóch różnych producentów i wytworzonych z dwóch różnych materiałów: polietylenu

i poliuretanu. Ponadto zbadano wpływ innowacyjnych podkładów kolejowych na aspekt finansowy firmy. Została przeprowadzona analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC i dowiedziono kluczowości recyklingu polietylenu stosowanego na innowacyjne podkłady kolejowe w celu zachowania opłacalności ekonomicznej.

Ważnym aspektem wdrożeniowym niniejszej pracy jest zaproponowanie prawnej ścieżki użycia innowacyjnych podkładów kolejowych na infrastrukturze kolejowej należącej do tzw. małego Zarządcy jakim jest firma Infra Silesia S.A. Dodatkowo rozdział ten daje pogląd na temat czynników, które należy brać pod uwagę podczas stosowania innowacyjnych podkładów kolejowych w zależności od rodzaju toru

W rozdziale szóstym zebrano i przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań zarówno pod kątem właściwości materiałów jak i zbadanych aspektów ekonomicznych i prawnych.

## **Abstract**

The concept of the work concerns the examination of the possibility of using innovative polymer sleepers in Poland, taking into account the costs in the product life cycle, which may translate into economic efficiency and have a positive impact on the environment while maintaining the technical parameters of the track. The thesis was written for the needs of DB Cargo Polska and Infra Silesia S.A., of which DB Cargo Polska is a 100% shareholder.

Nowadays, conscious enterprises put great emphasis on development, improvement of care for the environment, improvement of safety while maintaining cost and economic rationality.

This doctoral dissertation consists of eight chapters. After the chapter "Presentation of the essence of the issue", the chapter "Review of the literature" was presented, in which the theoretical part of the issue was explored.

The theoretical part presents currently used solutions in the field of railway sleepers in Poland, as well as solutions used on the international arena. The legal possibilities of using innovative railway sleepers in Poland were analysed, pointing to the conditions for their implementation and use in Poland. For this purpose, the literature of Polish and foreign law was analysed. The economic aspect plays a very important role in the implementation of an innovative solution in a company that affects the market area. In this work, the impact of polymer primers on economics was also examined. In the theoretical part, LCC analysis methods were described, and one was selected, which was used at a later stage of the doctoral thesis to calculate the cost of 1 km of track on traditional sleepers vs. innovative. Showing the purposefulness of searching for new innovative solutions has also found its place in the chapter devoted to environmental aspects. This chapter shows the importance of Polish regulations as well as European directives on everyday activities undertaken in the company. In order to meet them in the future and to be able to adapt the company to the latest ecological standards, it is important to strategically plan the company's activities, taking into account care for the environment.

The following chapters are a presentation of the completed research work, bringing the goal of the work closer to completion and proving the thesis put forward in it. The research part consists of testing samples of polymer underlays obtained from two different manufacturers and made of two different materials: polyethylene and polyurethane. In

addition, the impact of innovative railway sleepers on the financial aspect of the company was examined. An analysis of the desirability of recycling materials used for newly developed polymer railway sleepers based on LCC was carried out and the key use of recycling for polyethylene used for innovative railway sleepers was proven in order to maintain economic viability.

An important implementation aspect of this work is to propose a legal path for the use of innovative railway sleepers on the railway infrastructure belonging to the so-called a small manager, which is Infra Silesia S.A. In addition, this chapter gives an overview of the factors to be considered when using innovative sleepers depending on the type of track

The sixth chapter collects and presents the results of the tests carried out both in terms of the properties of materials and the examined economic and legal aspects.

Keywords: polymeric sleepers, life cycle costs, innovations, sustainable development.

## **SPIS TREŚCI**

<i>Streszczenie</i> .....	3
<i>Abstract</i> .....	5
<b>WYKAZ SKRÓTÓW I AKRONIMÓW .....</b>	<b>9</b>
<b>PRZEDSTAWIENIE ISTOTY ZAGADNIENIA .....</b>	<b>11</b>
<b>1. ANALIZA STANU WIEDZY DOTYCZĄCA PRZEDMIOTU BADAŃ .....</b>	<b>14</b>
1.1. Aspekty technologiczne.....	14
1.1.1. <i>Charakterystyka klasycznych podkładów kolejowych .....</i>	<i>14</i>
1.1.2. <i>Rozoznanie rynku innowacyjnych podkładów kolejowych.....</i>	<i>25</i>
1.2. Aspekty ekonomiczne.....	36
1.3. Aspekty środowiskowe.....	40
1.4. Aspekty prawne .....	47
1.4.1. <i>Charakter prawny podkładu polimerowego .....</i>	<i>47</i>
1.4.2. <i>Wprowadzenie do obrotu oraz dopuszczenie do eksploatacji podkładów                 polimerowych jako wyrobu budowlanego .....</i>	<i>48</i>
1.4.3. <i>Podsumowanie aspektów prawnych .....</i>	<i>57</i>
<b>2. ZAŁOŻENIA BADAWCZE.....</b>	<b>59</b>
2.1. Przedmiot badań, sytuacja problemowa .....	60
2.2. Cel i teza pracy .....	63
<b>3. METODYKA BADAŃ .....</b>	<b>64</b>
3.1. Cel badań .....	64
3.2. Badane materiały .....	64
3.3. Parametry badane.....	65
<b>4. OPIS PRZEPROWADZONYCH TESTÓW BADAWCZYCH .....</b>	<b>67</b>
4.1. Temperatura ugięcia pod obciążeniem HDT.....	67
4.2. Wytrzymałość na ściskanie.....	69
4.3. Wytrzymałość na zginanie.....	74
4.4. Ekspozycja w komorze klimatycznej .....	79
4.5. Różnicowa kalorymetria skaningowa (DSC) .....	81
4.6. Dynamiczna analiza mechaniczna (DMA).....	85

4.7.	Test palności .....	86
4.8.	Analiza LCC dla Przedsiębiorstwa DB Cargo Polska .....	89
4.9.	Analiza środowiskowych aspektów stosowania polimerowych podkładów kolejowych na infrastrukturze kolejowej zarządzanej przez spółkę Infra Silesia S.A. 99	
4.10.	Analiza prawna zastosowania podkładów polimerowych na infrastrukturze kolejowej zarządzanej przez firmę Infra Silesia S.A. ....	100
<b>5.</b>	<b>WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ.....</b>	<b>102</b>
5.1.	Temperatura ugięcia pod obciążeniem HDT .....	102
5.2.	Wytrzymałość na ściskanie.....	103
5.3.	Wytrzymałość na zginanie.....	108
5.4.	Ekspozycja w komorze klimatycznej .....	111
5.5.	Skaningowa kalorymetria różnicowa (DSC) .....	112
5.6.	Dynamiczna analiza mechaniczna (DMA) .....	116
5.7.	Test palności .....	119
5.8.	Wyniki analizy LCC .....	125
5.9.	Aspekty prawne .....	125
<b>6.</b>	<b>WNIOSKI.....</b>	<b>127</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>129</b>
	<b>SPIS RYSUNKÓW .....</b>	<b>135</b>
	<b>SPIS TABEL.....</b>	<b>138</b>



## **WYKAZ SKRÓTÓW I AKRONIMÓW**

B	- próbka brzegowa
cm	- centymetr
CRF	- współczynnik odzysku kapitału
CSRD	- Corporate Sustainability Reporting Directive (Dyrektywa w sprawie sprawozdawczości przedsiębiorstw w zakresie zrównoważonego rozwoju)
DSC	- Skaningowa kalorymetria różnicowa
EAP	- Employee Assistance Program (Program Wsparcia Pracowników)
EFRAG	- Europejska Grupa Doradcza ds.. Sprawozdawczości Finansowej
EFTA	- Europejskie Stowarzyszenie Wolnego Handlu
ESG	- Environmental, Social Responsibility, Corporate Governance (Środowisko naturalne, Społeczeństwo, Ład korporacyjny)
ESRS	- Europejski standard sprawozdawczości w zakresie zrównoważonego rozwoju
EZŁ	- Europejski Zielony Ład
FTIR	- Spektroskopia fourierowska w podczerwieni
HDT	- temperatura ugięcia pod wpływem ciepła
i	- stopa dyskontowa
IS	- Infra Silesia S.A.
J/cm <sup>2</sup>	- Dżul na centymetr kwadratowy
kg/ m <sup>3</sup>	- Kilogram na metr sześcienny
kN	- Kilo Newton
K <sub>n</sub>	- koszty nabycia
kN/cm <sup>2</sup>	- kilo Newton na centymetr kwadratowy
K <sub>p</sub>	- koszty posiadania (np. koszty energii)
kW/m <sup>2</sup>	- kilowat na metr kwadratowy
LCC	- Life Cycle Cost (Koszt cyklu życia)
mg/cm <sup>2</sup>	- miligram na centymetr kwadratowy
MJ/kg	- megaDżul na kilogram

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

mm	- milimetry
mm/min	- milimetr na minutę
MPa	- Mega Pascale
n	- lata eksploatacji
Oznakowanie CE	- deklaracja producenta
PE	- podkład wykonany z polietylenu
PE B	- próbka brzegowa podkładu polietylenowego
PE R	- próbka z rdzenia podkładu polietylenowego
PKP	- Polskie Koleje Państwowe
PP	- polipropylen
Ppm	- jednostka stężenia
PU	- podkład wykonany z poliuretanu
R	- próbka pobrana w okolicy rdzenia
T	- długość rozpatrywanego okresu
Tg/rok	- tera gramy brutto na rok
TSI	- Techniczna Specyfikacja Interoperacyjności
UE	- Unia Europejska
UTK	- Urząd Transportu Kolejowego
Vmax	- Prędkość maksymalna
$\Omega$	- Om

## **PRZEDSTAWIENIE ISTOTY ZAGADNIENIA**

Transport Kolejowy od zawsze był ważnym czynnikiem rozwoju gospodarczego każdego kraju, w tym także Polski, ze względu na swoje ekonomiczne jak również ekologiczne właściwości. Kluczowym zatem powinno być trzymanie obu tych faktorów- ekonomicznego i ekologicznego- pod kontrolą, jak również analizowanie wszystkich czynników wpływających na nie, oraz przeciwdziałanie zagrożeniom mogącym spowodować zmniejszenie konkurencyjności transportu kolejowego na rynku poprzez pogorszenie tych faktorów. Istnieje wiele składowych mających wpływ na ekologiczność i ekonomiczność transportu kolejowego, jednym z nich jest infrastruktura kolejowa i koszty jej utrzymania i modernizacji, które znacząco wpływają np. na wysokość kosztów dostępu do infrastruktury kolejowej jakie pobierane są przez Zarządców Infrastruktury. Utrzymanie infrastruktury kolejowej w stanie zapewniającym bezpieczny ruch kolejowy jest podstawowym obowiązkiem zarządców infrastruktury kolejowej wynikającym z Ustawy o Transporcie Kolejowym. Nie ulega wątpliwości, że wraz z rozwojem kolei i zwiększaniem prędkości oraz obciążen sieci kolejowej prawdopodobieństwo wystąpienia defektów nawierzchni kolejowej zwiększa się, przez co czynniki te będą powodowały znaczący wpływ na koszty utrzymania infrastruktury kolejowej m.in. poprzez częstsze wymiany podkładów kolejowych. Ponadto elementy infrastruktury kolejowej poddane są trudnym warunkom atmosferycznym, a także zmieniającym się obciążeniom dynamicznym wynikających z eksploatacji danej części infrastruktury. Brak właściwego utrzymania torów lub niewłaściwe materiały użyte do ich produkcji wpływają niekorzystnie na ich eksploatację: obniżenie dopuszczalnej prędkości jazdy, zmniejszenie spokojności jazdy, spadek bezpieczeństwa prowadzenia ruchu kolejowego, wzrost degradacji kruszywa oraz podtorza kolejowego, zwiększony wpływ oddziaływań dynamicznych na otaczającą zabudowę. Jednym z kosztotwórczych czynników infrastruktury kolejowej są podkłady kolejowe.

W Polsce istnieje kilka zarządców infrastruktury, w tym gronie znajduje się firma Infra Silesia S.A., dla której potrzeb została otwarta dana praca badawcza i podjęte działania zmierzające ku wsparciu rozwoju firmy.

Koncepcja pracy dotyczy zbadania możliwości zastosowania innowacyjnych podkładów polimerowych w Polsce mając na uwadze koszty w cyklu życia produktu co będzie znacząco przekładać się na efektywność ekonomiczną. Firma Infra Silesia S.A. będąca zarządcą infrastruktury kolejowej, jest firmą nastawioną na innowacje, dbającą o środowisko jak

również ukierunkowaną na długoterminowe działania zmierzające ku optymalizacji kosztów.

W części teoretycznej przedstawiono obecnie stosowane rozwiązania dotyczące infrastruktury kolejowej w Polsce, jak również porównano te rozwiązania z innymi stosowanymi na arenie międzynarodowej. Przeanalizowano prawne możliwości zastosowania innowacyjnych podkładów kolejowych w Polsce wskazując na warunki ich wdrożenia i zastosowania w Polsce. W tym celu przeanalizowano literaturę prawa polskiego i zagranicznego.

Bardzo ważną rolę we wdrożeniu innowacyjnego rozwiązania w przedsiębiorstwie, które dotyka obszaru rynkowego odgrywa aspekt ekonomiczny. W niniejszej pracy zbadano wpływ podkładów polimerowych na ekonomie. W części teoretycznej opisano metody analizy LCC i wybrano jedną, która w późniejszym etapie pracy doktorskiej została użyta w celu obliczenia kosztów 1km toru na podkładach tradycyjnych vs. innowacyjnych.

Podczas realizowania doktoratu pozyskano od dwóch producentów podkłady kolejowe, które posłużyły do części badawczej. Przeprowadzono badania pod kątem właściwości mechanicznych jak również zmian tych właściwości po upływie czasu i narażeniu ich na zmienne warunki atmosferyczne.

Badania zostały przeprowadzone na dwóch rodzajach materiałów od dwóch różnych producentów. Podkłady kolejowe z tworzywa sztucznego charakteryzują się dobrymi właściwościami tłumiącymi, a jednocześnie dużą wytrzymałością i odpornością na uderzenia. Oczekiwana żywotność podkładów plastikowych wynosi ponad 50 lat, co stanowi dobrą inwestycję przy niskich kosztach cyklu życia. Polimerowe podkłady ponadto przyczyniają się do znacznej redukcji wibracji i dźwięku. Wszystkie powyższe zalety nie będą miały wartości dla zarządców infrastruktury, gdy podkład kolejowy nie spełni swojego zastosowania zarówno w temperaturze 20 °C, która w Polsce notowana jest zimą jak i w temperaturze > 35°C jaką można zanotować latem. Wpływ temperatury na właściwości i charakterystykę podkładu ma zatem ogromne znaczenie zarówno dla bezpieczeństwa ruchu kolejowego jak i dla ekonomicznej oceny zastosowania podkładów polimerowych na infrastrukturze kolejowej w Polsce. Dlatego w niniejszej pracy materiały polimerowe – polietylen oraz poliuretan zbrojony włóknami szklanymi – zostały poddane badaniom określającym wpływ zmiennych warunków atmosferycznych na właściwości badanych podkładów polimerowych.

Wdrożeniowy charakter pracy podkreśla zaproponowany schemat działania dla spółki Infra Silesia S.A. wskazujący kroki konieczne do podjęcia w celu legalnej zabudowy podkładu polimerowego na dwóch typach infrastruktury kolejowej zarządzanej przez Infra Silesie S.A.

Ponadto, z uwagi na obecnie funkcjonujące dyrektywy Unii Europejskiej dotyczące zrównoważonego rozwoju jak również politykę przedsiębiorstwa przeanalizowano aspekty ekologiczne różnych rodzajów podkładów. Grupa DB Cargo Polska (do której należy spółka Infra Silesia S.A.) zgodnie z opublikowanym w 2022 roku dokumencie: „Raport zrównoważonego rozwoju grupy DB Cargo Polska za lata 2019-2020” przedstawia realizację założeń zrównoważonego rozwoju przez wszystkie spółki Grupy DB Cargo Polska. Raport zawiera konkretne przykłady proekologicznych i prospołecznych działań, co tylko podkreśla priorytety firmy, którymi jest tworzenie innowacji nastawionych na zrównoważony rozwój.

## **1. Analiza stanu wiedzy dotycząca przedmiotu badań**

### 1.1. Aspekty technologiczne

Droga szynowa, inaczej nazywana drogą kolejową to nawierzchnia kolejowa wraz z podtorzem, czyli budowlą geotechniczną wykonaną na gruncie rodzimym jako nasyp lub przekop wraz z urządzeniami odwadniającymi i zabezpieczającymi, na której ułożona jest nawierzchnia toru kolejowego. Pozostałymi elementami drogi szynowej są obiekty inżynierskie oraz grunt, na którym droga szynowa jest usytuowana. [1]

Nawierzchnia kolejowa to zespół konstrukcyjny, składa się z szyn, podkładów, złączy i podsypki. Elementy te służą do zbudowania toru szynowego, który stanowią dwa równoległe toki szynowe, ułożone w ustalonej między nimi odległości. Tor ma odpowiednie położenie w planie i profilu. Do nawierzchni kolejowej zalicza się także rozjazdy oraz skrzyżowania torów.

Podkłady kolejowe ze względu na sposób ich ułożenia w torze dzieli się na trzy rodzaje:

- podkłady poprzeczne, układane pod obydwooma tokami szyn prostopadle do osi toru,
- podkłady podłużne, układane osobno pod każdym tokiem szynowym, równoległe do osi toru,
- podkłady odosobnione, wykonane w postaci oddzielnych podpór pod każdym tokiem szynowym.

W nawierzchni podsypkowej stosowane są podkłady poprzeczne, przy których uzyskuje się najbardziej równomierny rozkład ciśnienia spodu podkładu na górną powierzchnię podsypki.

Do zadań podkładów należy:

- utrzymanie odpowiedniej szerokości toru, tzn. utrzymanie przymocowanych do nich za pomocą przytwierdzeń szyn w odpowiedniej odległości,
- przejmowanie z szyn i przekazywanie na podsypkę sił pionowych, poziome poprzeczne do osi toru oraz poziome działające wzdłuż osi toru;

#### 1.1.1. Charakterystyka klasycznych podkładów kolejowych

Ze względu na materiał, z jakiego wykonane są podkłady, rozróżnia się podkłady:

- drewniane,

- betonowe, żelbetowe, strunobetonowe,
- stalowe.

W Polsce stosuje się najczęściej podkłady drewniane oraz betonowe.

### **Podkłady drewniane**

Najczęściej podkłady wykonane są z miękkiego drewna, takiego jak sosna. Stosowane jest również drewno twarde: buk i dąb. Jednak przed położeniem podkładów należy je zaimpregnować specjalnym olejem kreozotowym, który chroni je przed gniciem. Drewniane podkłady charakteryzują się trwałością do 25-30stu lat.

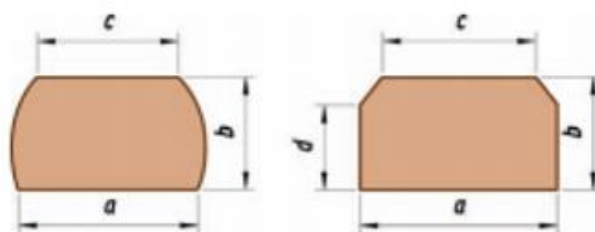
Największą wadą podkładów drewnianych jest koszt i negatywny wpływ na środowisko. Drewno nie należy do najtańszych materiałów a degradacja lasów dla potrzeb przemysłu nie wpisuje się w politykę zrównoważonego rozwoju przemysłu. Jednocześnie materiał drewniany jest wrażliwy na korozję biologiczną, co wymaga zastosowania wspomnianego już oleju jako środka impregnującego.



*Rysunek 1. Tor kolejowy zbudowany na podkładach drewnianych*

Z uwagi na kształt przekroju poprzecznego podkłady drewniane dzieli się na belkowe i obłe. Najwyższą jakością cechują się podkłady belkowe (Rysunek 1), wykonywane z pni o większej średnicy, których wszystkie powierzchnie są obrabiane mechanicznie. Podkłady obłe otrzymuje się z pni drzew o mniejszej średnicy, obróbce mechanicznej poddaje się jedynie ich wierzch oraz spód, a zaokrąglenia bocznych powierzchni przekroju są naturalnymi zaokrągleniami pnia po okorowaniu (Rysunek 2).

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*



Rysunek 2 Rodzaje podkładów drewnianych w Polsce [2].

Tabela 1. Wymiary podkładów drewnianych produkowanych i stosowanych w Polsce [2]

Typ podkładu	Wymiary [mm]				
	a	b	c	d	długość
I B	260	150	160	110	2600
II B	240	150	160	110	2600
III B	240	140	160	100	2500
II O	240	150	160	-	2600
III O	240	140	160	-	2500
IV O	220	140	160	-	2500

W Polsce jak i w Europie ze względu na ochronę lasów użycie podkładów drewnianych jest coraz mniejsze i jest ograniczane co roku. Użycie podkładów drewnianych ograniczone jest głównie do torów w łukach o małych promieniach, w których z powodu wymaganego zwiększenia szerokości toru nie ma technicznej możliwości stosowania podkładów betonowych. Na świecie podkłady drewniane są nadal powszechnie stosowane w krajach Ameryki Północnej oraz Rosji. W Tabeli 1. Przedstawiono wymiary tradycyjnych podkładów drewnianych.

Rodzaje podkładów drewnianych ze względu na właściwości wykorzystywanego materiału (Tabela 2.) dzieli się na:

- podkłady miękkie, w Polsce wykonywane z drewna sosnowego;
- podkłady twarde, w Polsce wykonywane z drewna dębowego lub bukowego, a także z importowanego afrykańskiego drewna azobe, charakteryzującego się niezwykłą twardością i odpornością na czynniki atmosferyczne.



*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

*Tabela 2. Własności gatunków stosowanych do produkcji podkładów w Polsce [2]*

Właściwości	Jednostka miary	Gatunek drewna			
		Sosna	Dąb	Buk	Azobe
Twardość metodą Janki	[MPa]	30	67	78	155
Twardość wg Brunella HB	[MPa]	11	34	34	53
Wytrzymał. na zginanie statyczne	[MPa]	71	117	210	316
Moduł sprężystości przy zginaniu	[MPa]	12000	13500	18000	24000
Gęstość przy wilgotności 15%	[kg/ m <sup>3</sup> ]	550	710	730	1140

Z drewna poza zwykłymi podkładami wykonuje się także podkłady specjalnego przeznaczenia: podrozdajdnice belkowe i obłe układane pod rozjazdami kolejowymi oraz mostownice, które są wykorzystywane przy układaniu nawierzchni kolejowej mocowanej bezpośrednio do konstrukcji mostów stalowych.

Podkłady, podrozdajdnice drewniane oraz mostownice przed użyciem są poddawane impregnacji pod ciśnieniem w temperaturze 70°C olejem kreozotowym. W ten sposób zabezpiecza się przed działaniem czynników atmosferycznych, grzybów oraz pleśni (Rysunek 3).



*Rysunek 3. Cylinder impregnacyjny [3]*

Wyjątkowym drewnem pod tym względem jest drewno azobe, którego gęstość uniemożliwia praktycznie jakąkolwiek impregnację i które z natury jest odporne na wpływ przedstawionych czynników.

Trwałość podkładów drewnianych zależy od: rodzaju drewna, sposobu nasycania i użytych do tego środki, typu szyn, rodzaju przytwierdzeń, rodzaju podsypki i podtorza, stanu utrzymania nawierzchni (zwłaszcza stan podsypki), obciążenie linii i wielkość oddziaływań dynamicznych, warunki atmosferyczne oraz klimatyczne.

Z powodu na różnorodność czynników atmosferycznych i mechanicznych niemożliwe jest określenie trwałości podkładów w sposób ścisły. Poszczególne zarządy kolejowe wyznaczają różne wielkości graniczne czasu użytkowania podkładów drewnianych, ustalając je na podstawie własnych obserwacji, wieloletnich doświadczeń. Przykładowo na kolejach francuskich trwałość podkładów drewnianych wynosi 20–25 lat, z kolei na kolejach rosyjskich trwałość tę ocenia się na 16 lat, zaś koleje brytyjskie dzielą trwałość w zależności od gatunku drewna; na trwałość podkładów decydujący wpływ ma także gatunek drewna, z którego zostały wykonane podkładu, przykładowo trwałość podkładów z drewna miękkiego ocenia się na 12–25 lat, a trwałość podkładów z drewna twardego – na 30–35 lat.

W Polsce przyjmuje się, że trwałość podkładów drewnianych wynosi:

- 18–21 lat dla podkładów z drewna miękkiego zaimpregnowanego,
- 25–30 lat dla podkładów z drewna twardego zaimpregnowanego,
- 40–50 lat dla podkładów z drewna azobe.

W Polsce najbardziej cenione są podkłady wykonane z drewna dębowego, gdyż posiadają największą odporność na gnicie i wytrzymałość na zgniatanie oraz mocno trzymają wkręty przytwierdzenia. Większa masa dębiny w porównaniu z sośniną jest zdecydowanie lepsza, gdyż zwiększa stateczność toru. Ponieważ dąb zawsze był drzewem drogim i trudno osiągalnym, materiał ten jest wykorzystywany wyłącznie do celów specjalnych takich jak produkcja podrozdnic do rozjazdów leżących w torach o  $V_{\max} \geq 100$  km/h. Podkłady bukowe dorównują dębowym, gdy są poddane bardzo starannej impregnacji. W przeciwnym wypadku bardzo szybko butwieją, a ich żywotność jest wtedy mniejsza nawet od podkładów sosnowych. Najczęściej w Polsce stosuje się podkłady i podrozdnicze z drewna sosnowego ze względu na cenę i dostępność.

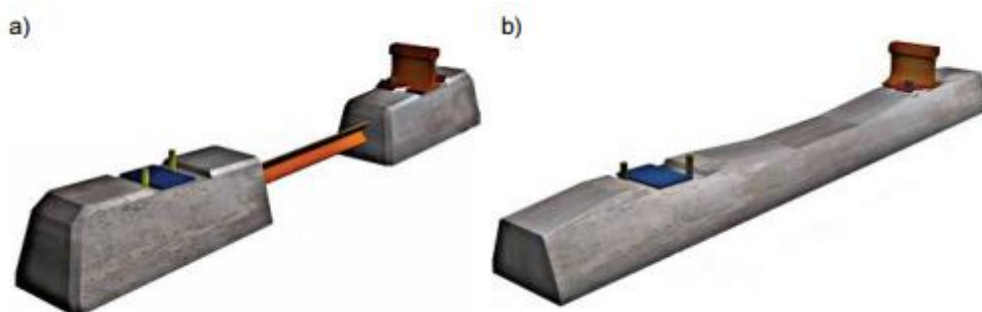
Do najważniejszych zalet podkładów drewnianych zaliczyć można małą masę (dzięki małej masie możliwa jest ręczna wymiana pojedynczych podkładów); dobre tłumienie drgań; małą emisję hałasu; brak destrukcyjnego wpływu na podsypkę (rozkruszania podsypki pod stopą podkładu); możliwość regeneracji rozkalibrowanych otworów na wkręty, jak również brak konieczności wymiany po niewielkich wykolejeniach oraz możliwość wykorzystania w torze układanym na podtorzu o złej jakości.

Z kolei najważniejsze wady podkładów drewnianych stanowią będą takie zagadnienia jak: znaczny koszt, wgniatanie podkładek żebrowych w podkłady, mała odporność na czynniki atmosferyczne; mała odporność na przemieszczenia w torze, trudności w pozyskiwaniu drewna odpowiedniej jakości, jak również coraz większe wymagania

stawiane nawierzchni kolejowej oraz względy ekologiczne (środki impregnacji szkodliwe dla środowiska, wycinka lasów w celu pozyskania podkładów).

#### **Podkłady betonowe: żelbetonowe i strunobetonowe (Rysunek 4)**

W celu ochrony kurczących się zasobów lasów oraz większe wymagania stawiane nawierzchni kolejowej spowodowały poszukiwanie innych materiałów do produkcji podkładów. Jednym z takich materiałów stał się beton. Podkłady wykonywane z betonu ze względu na sposób zbrojenia dzieli się na żelbetowe i strunobetonowe. Natomiast ze względu na kształt dzieli się je na dwublokowe i monoblokowe.



*Rysunek 4. Podkłady betonowe: a) podkład dwublokowy, b) podkład monoblokowy [4]*

W fazie produkcji podkładów betonowych montuje się w nich elementy przytwierdzeń szynowych takich jak dyble na wkręty lub kotwy do łapki SB, ich wytwarzanie wymaga ścisłego przestrzegania reżimów technologicznych. W przypadku podkładów wykonanych z betonu nie możliwa jest część napraw jak w przypadku podkładów drewnianych.

#### **Podkłady żelbetonowe (Rysunek 5):**

Wykonane z zbrojonego betonu. W porównaniu z podkładami drewnianymi posiadają o wiele dłuższą żywotność. Posiadają jednak jedną dużą wadę. Mianowicie drgania pochodzące od przejeżdżających pociągów, które przenoszone są poprzez szyny na podkłady niekorzystnie wpływają na beton, który jest elementem kruchym. Drgania te powodują występowanie rys i pęknięć, a więc doprowadzają do uszkodzeń podkładów i konieczności ich wymiany.

Największe, szkodliwe drgania występują tam, gdzie kolejne szyny toru łączone są ze sobą metodą łubkową (występuje przerwa międzyszynowa - źródło stukotu). Aby zapobiec

uszkodzeniom i wymianą podkładów żelbetowych, w miejscach łączy szyn stosuje się podkłady drewniane, które amortyzują drgania i są na nie bardziej odporne.

W związku z omówioną wadą podkładów żelbetowych obecnie stosowane są najczęściej podkłady betonowe strunowe zwane strunobetonowymi.



*Rysunek 5. Przykładowy tor na podkładach żelbetowych [5]*

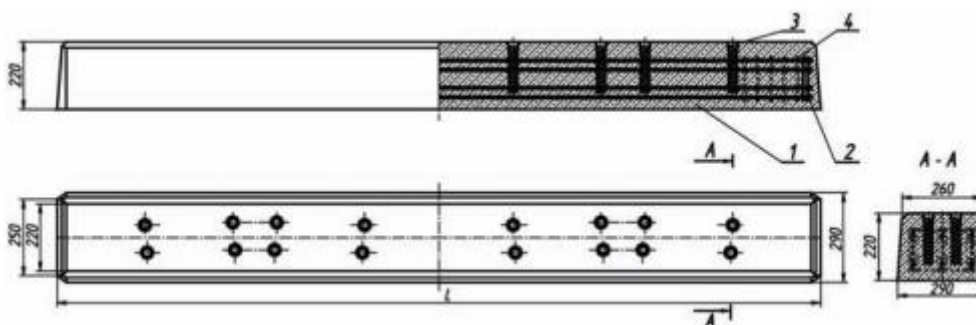
#### **Podkłady strunobetonowe (Rysunek 6):**

Wykonane są podobnie jak żelbetowe ze zbrojonego betonu jednak do ich wytwarzania stosuje się beton sprężony. Zbrojenie podkładu na czas zalewania betonem jest rozciągnięte (struna), a po zastygnięciu betonu zwalnia się naciąg i następuje sprężenie betonu, co zabezpiecza przed pęknięciami podkładu torowego. Podkłady strunobetonowe zbrojone są z reguły 8 prętami o średnicy 7 mm.



*Rysunek 6. Przykładowy tor na podkładach strunobetonowe [6]*

Poza produkcją zwykłych podkładów z betonu w ostatnich latach w Polsce produkuje się podrozdjadnice strunobetonowe. Produkcja ich jest możliwa dzięki dobrze opanowanej technologii produkcji podkładów betonowych i ich wysokiej jakości. Podrozdjadnice są produkowane w kompletach, każdy komplet jest inny dopasowany do danego rozdzadu. Każda podrozdjadnica ma swój własny numer na planie rozdzadu i odpowiedni rozkład dybli na wkręty (Rysunek 7).



Rysunek 7. Podrozdjadnica strunobetonowa SP93. 1- beton, 2 – wiązka zbrojenia, 3- dybel polietylenowy, 4-strzeżono, długość  $L=2,2-4,9$  m, rozkład i rozstaw dybli zależny od typu rozdzadu i podrozdjadnicy [5]

Jak podkłady drewniane tak podkłady betonowe posiadają swoje wady. Ich budulec, czyli beton i zbrojenie jest narażone na korozję. Intensywność korozji zależy m.in. od materiałów wysypujących się czy wylewających się z nieszczelnych wagonów i od prądów błędzących. W miarę upływu czasu maleje też mrozoodporność podkładów przykładowo (po 10 latach eksploatacji zmniejsza się ona o 25–30%). Ze względu na różnorodność odmian i typów podkładów oraz materiałów i technologii używanych do ich produkcji trudno jest określić precyzyjnie ich trwałość. Dodatkowo podanie ścisłych wartości jest niemożliwe ze względu na zmienność warunków eksploatacyjnych oraz bardzo duży wpływ, jaki na trwałość podkładów betonowych wywiera utrzymanie nawierzchni.

Według specjalistów trwałość podkładów betonowych określa się na 40–50 lat. W Polsce graniczny czas pracy podkładów betonowych określa się na:

- 35 lat na liniach o natężeniu przewozów większym od 15 Tg/rok,
- 40 lat na liniach, na których natężenie przewozów nie przekracza 15 Tg/rok.

Wśród wad tych podkładów największą jest przede wszystkim ich destrukcyjny wpływ na podsypkę ziarna podsypki w wyniku pracy podkładów są rozkruszane (skutek oddziaływań dynamicznych). Na powierzchni przylegania podkładu betonowego do tłuczni, czyli pod stopą podkładu, dwa nieelastyczne materiały (podkład i ziarna podsypki) spotykają się bezpośrednio w ten sposób, że nie jest możliwe ich wzajemne zazębienie się, takie jak w przypadku podkładów drewnianych. Poprzez ten proces ziarna podsypki są



rozkruszane. Zmniejsza się przez to możliwości przekazywania z podkładów na podsypkę sił działających w płaszczyźnie poziomej.

W celu zapobiegania przeciążeniom tłucznia, zwłaszcza na liniach przeznaczonych dla pociągów rozwijających duże prędkości, wprowadzono podkłady betonowe powlekane od spodu warstwą plastycznie odkształcalną (Rysunek 8).



*Rysunek 8. Podkład betonowy powlekany od spodu warstwą plastycznie odkształcalną [7]*

Dzięki użyciu tych warstw wzrasta stateczność położenia toru. Ponadto zmniejszają się naciski kontaktowe między podkładem i tłucznem, co w praktyce eliminuje zjawisko rozkruszania podsypki pod podkładem – pod tym względem podkład betonowy zaczyna się zachowywać jak podkład drewniany. Posiadają one również małą odporność uderową powoduje to ich masowe niszczenie w wypadku wykolejenia pociągu.

Do ich zalet należy natomiast zaliczyć: niską cenę, możliwość doboru konstrukcji podkładu do konkretnych wymagań, małą wrażliwość na pękanie oraz bardzo duży opór przeciwko przesunięciom toru (szczególnie dużą odporność na przesunięcia poprzeczne wykazują podkłady dwublokowe).

### **Podkłady stalowe (Rysunek 9)**

Tradycyjne podkłady stalowe są rzadkością w Europie, ale są powszechnie stosowane w krajach afrykańskich i Australii. Na przełomie ostatnich 10-ciu lat, popularność w Europie zyskał kolejny model – podkład stalowy typu Ypsilon. Podkłady te były używane do tej pory, wykazały swoją zdolność do zapewnienia doskonałej stabilności toru i minimalnych wymagań związane z obróbką powierzchni. [4]

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowooprojektowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

Do zalet zaliczamy tych podkładów zaliczamy:

- niska masa,
- duża trwałość
- niska wysokość konstrukcyjna
- możliwość powtórnego przetworzenia (recykling).

Do wad zaliczamy:

- podatność na korozję,
- przewodzenie prądu,
- podatność na wandalizm (kradzież),
- konieczność wymiany podkładu podczas wykolejenia pojazdu szynowego.

Przekrój podkładu stalowego ma kształt odwróconego koryta, z zagiętymi do dołu końcami.



*Rysunek 9. Przykład toru na podkładach stalowych*

Do zalet podkładów stalowych należy: duża trwałość, bardzo mała wysokość konstrukcyjna nawierzchni, w której są stosowane, dobre utrzymywanie szerokości toru oraz wybitnie wysoki opór przeciwko przesunięciom poprzecznym i podłużnym toru, dzięki wypełnieniu wnętrza podkładu przez podsypkę.

Do wad podkładów stalowych można wymienić: wysoką cenę, problemy z izolacją toków szynowych oraz z utrzymaniem toru za pomocą automatycznych podbijarek torowych.



*Rysunek 10. Podkład stalowy typu Ypsilon [5]*

Podkłady stalowe typu Y (Rysunek 10) w dotychczasowej eksploatacji wykazały zdolność do doskonałego zapewnienia stateczności toru i minimalne wymagania związane z utrzymaniem nawierzchni. W Polsce zastosowano je w bardzo trudnych warunkach terenowo- gruntowych, w zmodernizowanej nawierzchni kolei terenowo- liniowej na Gubałówkę w Zakopanem.

Tego rodzaju podkładów stosuje się przy budowie [8]:

- torów kolejowych podsypkowych - możliwość montażu wszystkimi metodami zarówno dla nowo budowanych linii, jak i modernizowanych wykonanych z podkładów belkowych,
- tuneli - niska wysokość konstrukcji (mniejszy przekrój poprzeczny),
- zwrotnic - obszar w okolicach zwrotnic również może być wykonany z podkładów stalowych ypsilon,
- stref przejściowych - jako standardowe rozwiązania albo specjalne rozwiązania dla indywidualnych przypadków.
- wąskich prześwitów - każda szerokość toru może być realizowana poprzez zmiany długości głównych podpór,
- torów zębatych - zębatka może być zamontowana w dolnej pozycji poprzez spawania lub śrubowanie.



### 1.1.2. Rozeznanie rynku innowacyjnych podkładów kolejowych

Rozwój kolejnictwa nigdy nie był tak dynamiczny jak to się dzieje w obecnych czasach. Podkłady, te tradycyjnie wykonane z drewna, były kluczowym elementem nawierzchni szyny od samego początku istnienia kolei. Podkłady betonowe, sprężone, a w niektórych rzadkich przypadkach stalowe – głównie w Australii i Afryce – zaczęły być używane dopiero w połowie XX wieku.

Postęp w dziedzinie chemii jak również postęp technologii przyczyniły się do wytworzenia materiałów kompozytowych wykonanych z włókien (szkła, węgla i aramidu) oraz różnych żywic.

Z roku na rok zwiększa się obszar ich zastosowania, w tym i w kolejnictwie, gdzie od lat 80-tych pojawiły się podkłady polimerowe.

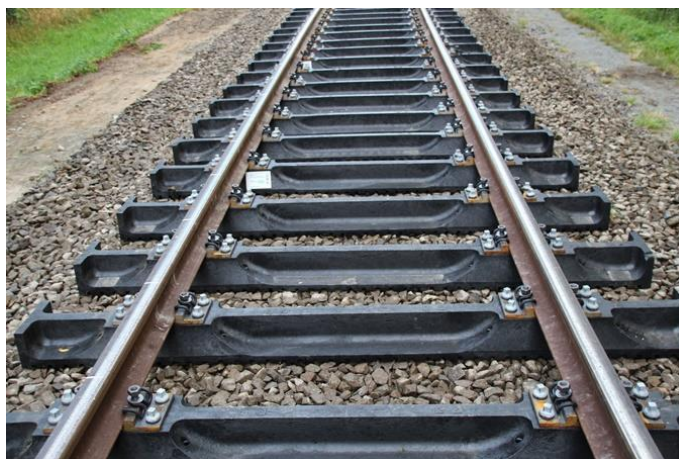
Przemysł lotniczy, kosmiczny, stoczniowy i budowlany wykorzystują już polimery. Rozwój materiałów budowlanych prowadzi do prób tworzenia podkładów kolejowych przy użyciu nowych materiałów. Ilości rodzajów przemysłów, w których polimery znajdują swoje zastosowanie są stosowane, zwiększają się z roku na rok, a podkłady polimerowe są stosowane w sektorze kolejowym już od 1980 roku.

Pierwsze eksperymenty, które bazowały na zastosowaniu materiałów polimerowych nie należały do udanych. Tłuczeń był chroniony przed skruszeniem, ale opór rusztu torowego na działanie poziomych sił podkładu przez tłuczeń został niestety zmniejszony.

Zaczęto je stosować w tunelach i na konstrukcjach mostowych a nie tylko na rozjazdach i szlakach. [76], [77], [78]

Od 1985 roku podkłady polimerowe są używane na japońskich kolejach. W 2003 roku w tym kraju wprowadzono JIS 1203, pierwszą normę dla tych podkładów.

Austria była pionierem w Europie w zabudowaniu podkładów polimerowych na infrastrukturze kolejowej i zrobiła to w 2004 r., następnie Niemcy w 2007 r., Holandia w 2012 r., Wielka Brytania w 2014 r. i Szwajcaria w 2014 r. Norma ISO 12856-1 dla "Plastikowych podkładów kolejowych" została wdrożona w marcu 2014 roku. [71], [72], [73], [74]



*Rysunek 11. Tor kolejowy na podkładach polimerowych KLP Lankhorst [9]*

Obecnie na rynku możemy rozróżnić kilka typów innowacyjnych podkładów kolejowych:

- podkłady bez wzmocnień (lub w krótkimi wzmocnieniami w postaci włókien),
- podkłady wzmacniane:
  - podłużnie włóknami,
  - podłużnie prętami stalowymi (Rysunek 11),
  - podłużnie i poprzecznie włóknami.

Poniżej przedstawiam przykłady podkładów z krótkimi wzmocnieniami lub bez nich występujące obecnie na rynku.

### **Podkłady firmy Sicut (Rysunek 13)**

Podkłady kolejowe Sicut wykonane są z materiałów pochodzących z recyklingu przy użyciu technologii opracowanych przez Rutgers, The State University of New Jersey i Polywood Inc cechują się doskonałą precyzją, znacznie lepszą trwałością co jest najważniejsze dla całego cyklu życia podkładu.

Szacuje się, że już ponad 300 000 podkładów kompozytowych wykonanych przy użyciu Rutgers i Polywood Technologies zostało zainstalowanych na torach na całym świecie, począwszy od USA po Europę i Australię (Rysunek 12).



*Rysunek 12. Przygotowane podkłady polimerowe firmy Sicut pod budowę toru [10]*

Podkłady wykonane przy użyciu technologii Rutgers i Polywood były szeroko testowane w ciągu 12 lat w pełnym zakresie norm AREMA i ASTM w USA, nie tylko w laboratorium i na torze testowym, ale także na głównych liniach. Powtórzono testy produktów, które były używane od ponad 10 lat, a testy te wykazały, że wydajność produktu w niektórych przypadkach uległa poprawie w trakcie użytkowania [9]. Podkłady Sicut są odporne na korozję i na nie chemiczne ługowanie. Posiadają lepsze cykle życia i mają większą trwałość niż konkurencyjne produkty wykonane z drewna, stali lub betonu. Są praktycznie odporne na wszystkie czynniki atmosferyczne: nie rdzewieją, nie kruszą się, nie gniją, nie wchłaniają wilgoci i nie wydzielają toksycznych chemikaliów do środowiska i są całkowicie odporne na ataki owadów. Do wszystkich tych zalet należy dodać, że podkłady Sicut są lekkie i nie wymagają znacznej konserwacji, co znacznie obniża koszty transportu i obsługi torowisk co zmniejsza tym samym koszty ogólne.



*Rysunek 13. Przykładowy podkład polimerowy firmy Sicut [10]*

**Zalety:**

- wysoka wytrzymałość i doskonałe tłumienie
- redukcja hałasu i wibracji

- dobra odporność chemiczna (odporność na korozje)
- wysoka odporność na czynniki atmosferyczne (podkłady kolejowe nie gniją, nie pękają i są nieprzepuszczalne dla wilgoci, grzybów i owadów)
- bezobsługowe w eksploatacji
- produkt z recyklingu oraz w 100% odnawialny produkt
- brak wypłukiwania do wód gruntowych
- niskie koszty cyklu życia; długi oczekiwany czas życia ponad 50 lat
- łatwa instalacja podkładów- lżejszy niż podkłady betonowe
- szybka możliwość recyklingu

Wady:

- duży koszt początkowy

### **Podkłady KLP Lankhorst**

100% materiał pochodzący z recyklingu. Stosowane na liniach rozjazdach i mostach. Kraj pochodzenia- Holandia. Podkłady kompozytowe KLP mają wysokie właściwości fizyczne, przy czym zachowują te właściwości podczas długiej długości życia ponad 50 lat. Są produkowane z odnawialnych tworzyw sztucznych oraz stalowych prętów usztywniających. Pomimo użycia tworzyw sztucznych podkłady zapewniają dobre właściwości tłumiące, jak również optymalną sztywność i zachowują te właściwości podczas ich długiej oczekiwanej żywotności ponad 50 lat.



*Rysunek 14. Podkłady polietylenowe [9]*

Podkłady firmy Lankhorst są stosowane w różnych obszarach (Rysunek 14), nie tylko na głównych torach, ale też mostach, rozjazdach czy przejazdach. Jest produkowany z wysokiej jakości plastycznego polietylenu ze stalowymi prętami zbrojeniowymi, co zapewnia zarówno wysoką wytrzymałość, jak i doskonałą charakterystykę tłumienia. Firma Lankhorst zaprezentowała hybrydowy podkład z tworzywa sztucznego dla przemysłu kolejowego na początku 2006 roku. Zakaz użycia krezotolu i ograniczonej dostępności drewna twardego był głównym powodem dla firmy Lankhorst do opracowania podkładu z tworzywa sztucznego, który jest w 100% wyprodukowany z przetworzonych tworzyw sztucznych. Od czasu wprowadzenia Lankhorst dostarczył różne typy hybrydowych podkładów kolejowych do wielu projektów w Holandii, Francji, Austrii, Niemczech, Szwecji i Malezji. Trwałość podkładów liczona jest na ponad 50 lat, co stanowi dobrą inwestycję przy niskich kosztach cyklu życia w porównaniu do podkładów drewnianych. Podkłady dębowe krezotowane mają żywotność od około 25 do 30 lat. Żywotność nietraktowanych podkładów dębowych ogranicza się do około 12 lat.

Aby uzyskać wymaganą sztywność i wytrzymałość, podkłady przeładunkowe i krzyżowe z tworzywa sztucznego są wzmocnione 4 stalowymi prętami. Stalowe pręty zbrojeniowe są całkowicie zamknięte i wtopione w tworzywo sztuczne. Lankhorst opracował ten opatentowany proces produkcyjny we własnym zakresie (Rysunek 15).



*Rysunek 15. Przekrój podkładu polietylenowego- blokowego [9]*





*Rysunek 16. Podkłady kompozytowe w rozjazdach i skrzyżowaniach*

Podkłady kompozytowe idealnie nadają się do balastowania torów kolejowych (czyli obsypywania toru tłuczniem z wagonu), na przykład przy zastosowaniu rozjazdów i skrzyżowań (Rysunek 16). Elastyczność tworzywa zapewnia dobre tłumienie i zmniejsza zużycie. Stalowe pręty całkowicie zamknięte w polimerze wzmacniają podkład kolejowy i optymalizują jego sztywność. Te kompozytowe podkłady mają tę samą charakterystykę tłumienia, co podkłady drewniane, dzięki czemu nadają się do wymiany drewna 1:1. Nietraktowany podkład dębowy ma żywotność około 10 lat.

Od momentu wprowadzenia na rynek w 2006 r. Hybrydowe podkłady kolejowy sprawdza się już w wielu lokalizacjach w Holandii, Niemczech, Austrii, Francji, Szwecji, Malezji i wielu innych krajach. Na przykład, KLP® Hybrid Polymer Switch & Crossing Sleeper jest zatwierdzony przez holenderskiego zarządcę infrastruktury ProRail do użytku na głównym torze i jest instalowany jako substytut dla tradycyjnych drewnianych wsporników.

Do zalet tego rodzaju podkładów należy:

- wysoka wytrzymałość i doskonałe tłumienie,
- redukcja hałasu i wibracji,
- dobra odporność chemiczna,
- podkłady kolejowe nie gniją, nie pękają i są nieprzepuszczalne dla wilgoci, grzybów i owadów,
- produkt z recyklingu oraz w 100% odnawialny produkt,
- niskie koszty cyklu życia; długi oczekiwany czas życia ponad 50 lat
- łatwa instalacja podkładów.

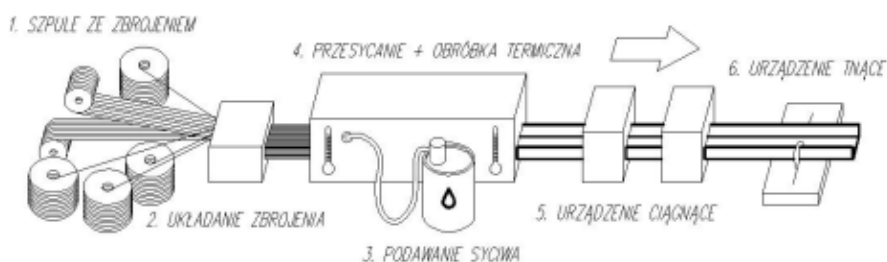
Wady:

- duży koszt początkowy.

### **Podkład kompozytowy Sekisui FFU (Rysunek 18)**

Podkład syntetyczny z FFU produkowany jest metodą prasowania ciągłego z wytłaczaniem ciągłych włókien szklanych namoczonych w poliuretanie. Podwyższona temperatura w procesie jest czynnikiem utwardzającym. Produkcja realizowana jest w procesie ciągnięcia profilu z syntetyku drewnopodobnego z maszyny utwardzającej. Wyprodukowany jednolity blok materiału można ciąć na odcinki o długości do 12 m. Dzięki jednorodności tworzywa, z którego produkowane są podkłady, zachowanie materiału w warunkach użytkowania są przewidywalne, czego nie można powiedzieć o naturalnym drewnie czy podkładach betonowych czy stalowych.

Poltruzja to metoda produkcji podkładów kompozytowych (Rysunek 17). Jest to metoda przemysłowa o charakterze ciągłym pozwalająca uzyskiwać elementy o długości do 12 m. Produkowane podkłady mają następujące wymiary: długość 260 cm, szerokość 26 cm i różną grubość, tj. 10, 12 i 16 cm. [11]



Rysunek 17. Schemat produkcji podkładów metodą poltruzji [11]

„Znacznie lepsza charakterystyka techniczna umożliwia również zoptymalizowanie przekroju podkładu, co jest bardzo korzystne (szczególnie na mostach). Ponieważ kompozyt składa się z komórek zamkniętych, nie wchłania wody i jest bardzo odporny na tłuszcze i inne zanieczyszczenia. Spód podkładu syntetycznego ułożony na podsypce zachowuje się tak samo, jak spód podkładu drewnianego.” [12]

Kompozyt polimerowy składa się z ciągłych włókien szklanych, które są „zatopione” w żywicy poliuretanowej. Swoje właściwości uzyskują w procesie dojrzewania w temperaturze około 180 – 200° C. Gęstość tego materiału wynosi średnio około 740 kg/m<sup>3</sup>. Cechuje się on praktycznie brakiem przewodności elektrycznej i dużą odpornością na oddziaływania chemiczne np. olej, smary, produkty zanieczyszczające środowisko. Materiał ten nie absorbuje wody. Nie ulega on spękaniu w temperaturze do – 20° C.

Dane dotyczące najważniejszych właściwości podkładów z drewna i kompozytów przedstawiono w Tabeli 3.

*Tabela 3. Właściwości podkładów z drewna i kompozytów [12]*

Właściwości		Jednostka	Podkłady drewniane	Podkłady z kompozytów polimerowych		
				Nowe	10-letnie	15-letnie
Gęstość		kg/m <sup>3</sup>	750	740	740	740
Wytrzymałość na zginanie		kN/cm <sup>2</sup>	8	14.2	12.5	13.1
Moduł sprężystości		kN/cm <sup>2</sup>	710	810	800	816
Wytrzymałość na ściskanie		kN/cm <sup>2</sup>	4.0	5.8	6.6	6.3
Wytrzymałość na ścinanie		kN/cm <sup>2</sup>	1.2	1.0	0.95	0.96
Twardość		kN/cm <sup>2</sup>	1.7	2.8	2.5	2.7
Odporność na uderzenia	+ 20°C	J/cm <sup>2</sup>	20	41	-	-
	- 20°C	J/cm <sup>2</sup>	8	41	-	-
Współczynnik absorpcji		mg/cm <sup>2</sup>	137	3.3	-	-
Współczynnik izolacyjności elektrycznej	sucho	Ω	6.6x10 <sup>7</sup>	1.6x10 <sup>13</sup>	2.1x10 <sup>12</sup>	3.6x10 <sup>12</sup>
	wilgotno	Ω	5.9x10 <sup>4</sup>	1.4x10 <sup>5</sup>	5.9x10 <sup>10</sup>	1.9x10 <sup>5</sup>
Siła haka szynowego		kN	25	28	28	23
Siła wyrwania wkrętu kolejowego		kN	43	65	-	-

Syntetyk drewnopodobny z FFU można obrabiać w tradycyjny sposób, tak samo jak naturalne drewno. Wiercenie, piłowanie, frezowanie i dłutowanie- wykonuje się tymi samymi standardowymi narzędziami. Przewaga kompozytu FFU nad drewnem polega m.in. na większej twardości i na niemal całkowitym braku porów. Najtrwalsze w przypadku obróbki tego materiału są narzędzia z ostrzami ze spieku widia i narzędzia do obróbki stali.

Podczas obróbki podkładów należy zwrócić uwagę na nagrzewanie się narzędzi. Jest to pewna wada ale ten problemem można zniwelować, zmniejszając nieco obroty lub posuw, co zapobiega również stąpieniu się włókna szklanego od nadmiernej temperatury. Stabilność wymiarowa podkładów i ich dostosowanie fabryczne do specyfikacji umożliwiają szybkie, precyzyjne i pewne wykonywanie pracy na torowisku. Nakłady pracy i okresy wyłączenia torowiska z eksploatacji można zoptymalizować.

Dużą zaletą tego rodzaju podkładów jest możliwość ich naprawy na miejscu. W porównaniu do podkładów drewnianych czy betonowych, gdzie uszkodzenia spowodowane błędem ludzkim często nie są możliwe do naprawy i skutkują wymianą pojedynczego podkładu czy większej ilości.



Zalety Podkładów FFU:

- szybka naprawa oraz krótkie wyłączenia torów,
- standardowe sposoby mocowania oraz zastosowanie standardowych narzędzi,
- poprawa bezpieczeństwa na kolei,
- doskonała charakterystyka techniczna,
- wysoka oporność elektryczna (izolacyjność).

Do wad podkładów FFU zaliczamy nagrzewanie się narzędzi przy długiej pracy oraz duży koszt początkowy



*Rysunek 18. Podkład kolejowy FFU z firmy Sekisui[12]*

### **Podkłady firmy TieTek**

Podkłady kolejowe produkowane są w 85% z materiałów po recyklingowych. Materiały użyte podczas produkcji to plastik, guma ze zużytych opon i odpadowe włókna szklane. Podczas procesu wytwarzania wszystkie te składniki łączone są z wypełniaczami mineralnymi w celu wytworzenia podkładu, który jest niezwykle mocny, trwały i odporny na warunki środowiskowe. Podkłady kolejowe przez firmę TieTek wytwarzane są w USA i stosowane na torach tranzytowych i torach klasy 1. [13]

### **Podkłady firmy Axion**

Podkłady kolejowe firmy Axion wykonane są z tworzywa sztucznego pochodzącego z recyklingu z dodatkiem polimeru wypełnionego włóknem szklanym. Podkłady te charakteryzują się bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi. Wysoka wytrzymałość na ściskanie i zginanie powoduje, że podkłady nie są podatne na odkształcenia. [14]

### **Podkłady IntegriCo**

Podkłady kolejowe firmy IntegriCo produkowane są w USA. Do wytworzenia produktu stosowane jest niezwykle twarde tworzywo sztuczne, które podczas procesu produkcyjnego zachowuje właściwości plastiku, czyniąc go wytrzymałym materiałem. Koszty wytworzenia takiego podkładu są konkurencyjne ze względu na stosowany materiał, który pochodzi z recyklingu. Niska temperatura przetwarzania tworzyw sztucznych pochodzących z recyklingu pozwala na zwiększenie wytrzymałości produktu w porównaniu do produktów z tworzyw sztucznych wytwarzanych na gorąco. Za pomocą metody wytwarzania w niskiej temperaturze, podkłady są wyższej jakości ze względu na wiązania utworzone między komponentami. [15]

### **Kompozytowe podkłady geopolimerowe**

Geopolimerowy beton używany do produkcji podkładów kolejowych wykazuje dużo lepszą oporność elektryczną. Porównując energochłonność różnych materiałów takich jak stal, aluminium czy kompozyty i żelbet dla budownictwa od etapów wydobycia surowców, produkcji i wytwarzania materiału, dostawy materiał na plac budowy i konserwację przez cały projektowy okres użytkowania konstrukcji, okazało się, że kompozyty zużywają około połowę całkowitej ilości energii, niż jakkolwiek inny materiał budowlany. Zaletą tych podkładów jest niska waga, odporność na korozję, wysoka wytrzymałość zmęczeniowa, wysokie tłumienie i neutralność elektromagnetyczna. [16]

### **Kompozytowe podkłady z domieszką kauczuku**

Kauczuk naturalny jest powszechnie stosowany w przemyśle ze względu na duży współczynnik rozciągliwości i wysoką sprężystość. Właściwości hydrolityczne są duże, co powoduje, że podkłady są wodoodporne. Opisywane podkłady kolejowe, które w swoim składzie posiadają kauczuk naturalny. [17]

## **Greenrail Group**

Podkłady Greenrail™ składają się z zewnętrznego pokrycia wykonanego z mieszanki opon wycofanych z eksploatacji (ELT) i plastiku pochodzącego z recyklingu oraz wewnętrznego rdzenia ze sprężonego, zbrojonego betonu. Podkłady Greenrail gwarantują wszystkie właściwości mechaniczne podkładów kolejowych, oferując następujące niezliczone korzyści:

- mniejsze rozdrobnienie balastu, a co za tym idzie obniżenie kosztów utrzymania;
- dłuższa żywotność;
- większa odporność na boczne przemieszczenia szyn;
- znaczna izolacja elektryczna;
- większa odporność na zjawisko zamrażania/rozmarzania;
- ochrona rdzenia betonu przed piaskiem w rejonach pustynnych;
- redukcja poziomu wibracji i hałasu pochodzącego od ruchu kolejowego;
- identyfikowalność produktu dzięki technologii RFID;
- odzysk i ponowne wykorzystanie ton tworzyw sztucznych i ELT (do 35 ton) na każdy kilometr linii kolejowej.

Wewnętrzny rdzeń w betonie pozwala na produkcję podkładów o odpowiedniej masie i właściwościach konstrukcyjnych dla różnych typów linii kolejowych, także tych dużych prędkości. Greenrail™ jest jedynym podkładem na świecie uzyskanym z materiałów pochodzących z recyklingu i zaprojektowanym do wykorzystania systemu mocowania szyny „W”, wstępnie zmontowanego fabrycznie. System „W” pozwala na szybszy montaż i zastosowanie standardowych układów mechanicznych do renowacji i układania torów.

W porównaniu do podkładów kolejowych żelbetowych i kompozytowych technologia opatentowana przez Greenrail oferuje liczne korzyści w aspekcie ekonomicznym i bezpieczeństwa, ale przede wszystkim pozwala wnieść istotny wkład w ponowne wykorzystanie odpadów z tworzyw sztucznych i opon wycofanych z eksploatacji, co jest zgodne z obiegiem zielonej gospodarki. Jednocześnie produkty Greenrail odpowiadają zarówno międzynarodowym regulacjom, jak i specyficznym lokalnym potrzebom, co świadczy o tym, że firma jest ważnym graczem w dedykowanym sektorze.

### **Pioneer GmbH**

Dzięki opatentowanej technologii firmy przetwarza zmieszane tworzywa sztuczne pochodzące z recyklingu, aby osiągnąć spójność i integralność strukturalną we wszystkich kompozytowych podkładach kolejowych.

### **Atlas Ties**

Jednym ze składników specjalnie opracowanych podkładów kolejowych jest niezwykle wytrzymały, usieciowany polietylen. Używa się procesu niskotemperaturowego, aby zachować wytrzymałość i sztywność surowców;

Analizując literaturę przedmiotu jak również obserwując zastosowania mające miejsce w innych regionach świata można wywnioskować, że istnieje duże pole do zastosowania innowacyjnych polimerowych podkładów kolejowych na infrastrukturze kolejowej w Polsce. Do celów badawczych pozyskano dwa rodzaje innowacyjnych podkładów kolejowych: polietylenowe (recyklingowany) i poliuretanowe. Oba rodzaje podkładów poddano badaniom.

#### 1.2. Aspekty ekonomiczne

Rachunek kosztów życia produktu (Life Cycle Cost- LCC) jest nowoczesną koncepcją ukierunkowaną na strategiczne zarządzanie kosztami i nie posiada spójnej definicji. D. Haworth przedstawił LCC jako określenie, w którym rachunek cyklu życia produktu jest używany w klasycznym podejściu dla procesu gromadzenia informacji o kosztach i przychodach określonej decyzji za okres cyklu życia tej decyzji, tzn. od chwili powstania koncepcji produktu do momentu wycofania go ze sprzedaży. [18]

Dla S. Ansami i J. Bella rachunek cyklu życia usługi jest zsumowanymi kosztami działań, pojawiającymi się od momentu powstania pomysłu nowego produktu aż do momentu jego wycofania z rynku. Autorzy ci zwracają uwagę, że cykl życia nie kończy się w momencie zakończenia sprzedaży, gdyż przedsiębiorstwa po tym etapie mogą jeszcze oferować serwis i obsługę „posprzedażną”. [19]

Z kolei D.G. Woodward definiuje te pojęcie jako suma wszystkich wydatków poniesionych od wsparcia produktu w jego wymyśleniu, aż do końca jego użyteczności. [20]

W rozumieniu Amerykańskiego Instytutu Zarządzania Logistycznego jest to suma kosztów posiadania tego zasobu, włącznie z kosztami nabycia lub wytworzenia,

użytkowania w działalności gospodarczej, naprawami, przeszkoleniem personelu oraz kosztami likwidacji danego zasobu. [21]

Baussbaine i Kirkham określili tzw. pełny rachunek kosztów życia (Whole of Life Cycle), który kładzie nacisk nie tylko na koszty bezpośrednie związane z określonym produktem, ale także na koszty: kapitału, ryzyka i ochrony środowiska z dużym naciskiem na problem wyboru odpowiednich metod prognozowania. Należy zauważyć, że termin „produkt” należy interpretować jako odniesienie do klasy produktów — a nie jako pojedynczej pozycji — i że może odnosić się zarówno do produktów fizycznych, jak i usługi. [22]

W rachunkowości zarządczej przez cykl życia produktu rozumie się model odwzorowujący zdolność danej klasy produktu do generacji przychodu środków pieniężnych. Nadwyżka przychodów ze sprzedaży z poszczególnych faz nad skumulowanymi kosztami – obejmującymi koszty wytwarzania, sprzedaży serwisu, a także koszty badań, rozwoju i likwidacji – stanowi łączny zysk z cyklu życia produktu. W cyklu tym przychody występują w fazie wzrostu, największą wartość uzyskują w fazie nasycenia, nie powstają natomiast w fazie rozwoju oraz w fazie schyłku (spadku). [23]

W Polsce metodologię określania kosztów cyklu życia budynków określa Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 23 listopada 2021 r. [24], które rekomenduje stosowanie kalkulacji sporządzanej metodą prostą, przy uwzględnieniu kosztów nabycia, użytkowania oraz utrzymania, pomijając koszty likwidacji budynku. Mając na uwadze przepisy ogólnoswiatowe to równie istotne informacje można także znaleźć w normie ISO 15686-5:2008, która dodatkowo uwzględnia tzw. nonconstructions costs (koszty niekonstrukcyjne). [25][75]

Wybór odpowiedniej metody obliczania LCC zależy od wielkości i stopnia złożoności konkretnej inwestycji. W zależności od potrzeb analizę LCC można przeprowadzić na dwa sposoby:

1) Metodą prostą – jest ona wykorzystywana do przeprowadzenia prostych porównań. Nie uwzględnia jednak zmiany wartości pieniądza w czasie (brak dyskontowania) czy zmian ceny energii, co może dodatkowo przyczynić się do wzrostu opłacalności inwestycji.

2) Metodą złożoną – obejmuje analizę zdyskontowanych przepływów pieniężnych w okresie od zakupu do odstawienia urządzenia z użytkowania łącząc różne elementy kosztów, takie jak energia, utrzymanie, naprawy, przeglądy, demontaż końcowy itp.

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

Równanie dla metody prostej

$$LCC = \text{Koszt nabywania} + \text{Koszt posiadania} + \text{Koszt likwidacji}$$

Koszt nabywania = koszt inwestycji

Koszt posiadania = (przykładowo) koszt instalacji + koszt energii + koszt konserwacji i napraw + koszt przerw w eksploatacji i strat produkcyjnych + ewentualnie koszt ochrony środowiska ponoszony w trakcie użytkowania (np. utylizacja zużytych części, opłaty środowiskowe)

Koszt likwidacji = koszt wycofania z użytkowania (np. utylizacji, ewentualnie rekultywacji)

Równanie dla metody złożonej

a) uwzględniające zmienność cen wraz z wpływającym czasem

$$LCC = K_N + \sum_{n=1}^T \frac{K_p}{(1+i)^n}$$

$K_N$  - koszty nabywania

$K_p$  - koszty posiadania (np. koszty energii)

$i$  - stopa dyskontowa

$n$  - lata eksploatacji

$T$  - długość rozpatrywanego okresu

b) przy założeniu, że ceny są stałe przy okresie życia

$$LCC = K_N + \frac{K_p}{CRF}$$

$K_N$  - koszty nabywania

$K_p$  - koszty posiadania (np. koszty energii)

$CRF$  - współczynnik odzysku kapitału

$CRF$  oblicza się w sposób następujący:

$$CRF = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}}$$

$i$  - stopa dyskontowa

$n$  - lata eksploatacji [26]

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

Tabela 4. Wybrane koszty życia produktu z perspektywy producenta

Faza przetwarzania	Pozycja kosztów	Wyszczególnienie	
Faza przedprodukcyjna	Koszty początkowe inwestycji	Koszty projektowania	
		Koszty badań rynku	
		Koszty zakupu i urządzeń oprogramowania	
		Koszty analizy i ryzyka	
		Koszty analizy wpływu na środowisko	
		Koszty opracowania logistyki	
		Koszty dopasowania linii technologicznej	
		Koszty sprzętu rezerwowego	
		Koszty związane z organizacją i ryzykiem	
	Koszty montażu i rozruch (park maszynowy)	Koszty montażu urządzeń podstawowych	
		Koszty urządzeń pomocniczych	
		Koszty wstępnego szkolenia personelu	
		Koszty opracowania instrukcji obsługi	
		Koszty oceny przy wykonaniu	
Faza produkcyjna	Koszty energii	Koszty zużycia energii elektrycznej	
	Koszty eksploatacji (koszty realizowanego przedsięwzięcia)	Koszty pracownicze	
		Koszty zużycia surowców i materiałów	
		Koszty odtworzeniowe	
		Koszty transportu wewnętrznego	
		Opłaty za licencje, koncesje, patenty	
		Amortyzacja	
	Koszty obsługi i napraw	Koszty robocizny	
		Koszty zużycia materiałów i energii	
		Koszty testów i wyposażenia dodatkowego	
	Koszty przestojów	Koszty utraconych korzyści	
		Koszty ponownego uruchomienia	
	Koszty ochrony środowiska	Opłaty produktowe	
		Opłaty za korzystanie ze środowiska	
		Koszty zagospodarowania odpadów	
		Kary za ujemne oddziaływanie na środowisko	
		Nakłady inwestycyjne związane z redukowaniem oddziaływania na środowisko	
	Faza poprodukcyjna	Koszty demontażu i utylizacji	Koszty zbiórki odpadów
			Koszty recyklingu i odzysku
Koszty utylizacji odpadów niebezpiecznych			

Źródło: A. Matuszak-Flejszman (red.) Zarządzanie procesami i produktami w organizacji. Wybrane zagadnienia. Poznań 2020.

Firma DB Cargo Polska jest ukierunkowana na strategiczne zarządzanie kosztami. Dlatego koniecznym staje się fakt obliczenia LCC dla przykładowego 1km toru dla czterech proponowanych podkładów kolejowych: drewnianych, betonowych, polietylenowych i poliuretanowych. Mając na uwadze dwie metody obliczania LCC w części badawczej przygotowano zestawienie zarówno wg metody prostej- nie uwzględniającej zmiany pieniądza w czasie, jak i wg metody złożonej- uwzględniającej zmianę pieniądza w czasie. Przedsiębiorstwo jest zainteresowane zarówno skumulowanymi kosztami cyklu życia produktu dla 4 różnych produktów w celu analizy różnicy kosztów pomiędzy podkładami tradycyjnymi oraz nowoczesnymi jak również ważnym aspektem będzie przeanalizowanie różnicy kosztów życia produktów dla podkładów nowoczesnych (polietylenowe vs. poliuretanowe). Celem wyliczeń i analizy LCC powinna być rekomendacja użycia podkładów pod kątem kosztowym.

### 1.3. Aspekty środowiskowe

Spośród wielu problemów środowiskowych, przed którymi stoi ludzkość, dwa najbardziej niepokojące to zmiana klimatu i zanieczyszczenie tworzywami sztucznymi. Te dwa wyzwania środowiskowe mają daleko idące konsekwencje dla zdrowia ludzkości i ekosystemów, a rozwiązania tych problemów będą musiały pochodzić z całego spektrum ludzkich wysiłków [27]

Bezpieczeństwo ekologiczne uznawane jest współcześnie za jeden z najważniejszych elementów niemilitarnej odmiany bezpieczeństwa. W aspekcie bezpieczeństwa narodowego ochrona środowiska przyrodniczego człowieka ujmowana jest również w kontekście interesów narodowych. Ujęcie takie z pewnością dowartościowuje problematykę ochrony środowiska. [28]

Poniżej kilka różnych definicji bezpieczeństwa ekologicznego:

1) Bezpieczeństwo ekologiczne to stan przeciwdziałania społecznego skutkom przekształceń otaczającego środowiska. [29]

2) Bardziej pełna definicja brzmi następująco: Bezpieczeństwo ekologiczne to trwały i ciągły proces zmierzający do osiągnięcia pożądanego stanu ekologicznego, zabezpieczający spokojną i zdrową egzystencję wszystkich elementów ekosystemu, przy użyciu różnych środków zgodnych z zasadami współżycia wewnętrznego państwa i społeczności międzynarodowej. [30]



Można też mówić o systemie bezpieczeństwa:

3) Bezpieczeństwo ekologiczne to likwidacja lub zmniejszenie do minimum zagrożeń zdrowia i życia człowieka, których źródłem jest środowisko naturalne. [31]

Takie podejście sprawia jednak, że przeciwdziałanie skutkom rozpoczyna się dopiero po zaistnieniu samego zagrożenia, a konkretnie szkód, jakie się ujawniły. Takie stanowisko spowodowało, że przez wiele lat bezpieczeństwo ekologiczne traktowane było tylko jako prawne dążenie państw do ochrony swego środowiska naturalnego i zdrowia ludzi przed antyekologicznymi działaniami innych państw, bez uwzględniania możliwości przeciwdziałania.

4) Bezpieczeństwo ekologiczne (ang. ecological security) – zespół uwarunkowań chroniących człowieka i środowisko przed zagrożeniami ekologicznymi oraz takie kształtowanie stosunków naturalnych i społecznych w biosferze Ziemi, które tworzy właściwe warunki życia dla całej ludzkości, nie podważając zarazem podstaw życia na naszej planecie, głównie poprzez wdrażanie i realizację koncepcji zrównoważonego rozwoju. [32]

Powyższa definicja bezpieczeństwa ekologicznego po raz pierwszy wyraźnie wskazuje na rolę koncepcji zrównoważonego rozwoju i jest bliska stanowisku przedstawianemu w tej pracy.

Najczęściej spotykana w literaturze jego definicja brzmi: „Wzrost zrównoważony to taki wzrost, którego istotą jest zapewnienie trwałej poprawy jakości życia współczesnych i przyszłych pokoleń poprzez kształtowanie właściwych proporcji między trzema rodzajami kapitału: ekonomicznym, ludzkim i przyrodniczym”. W Polsce aspekty dotyczące ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju określa m.in. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska. Analizując definicję zawartą w ustawie można powiedzieć, iż celem ochrony środowiska jest zarówno przeciwdziałanie aktualnym jak i przyszłym zagrożeniom, poprzez propagowanie nowej, ekologicznej rzeczywistości.

Obserwujemy coraz bardziej negatywny wpływ człowieka na otaczający nas świat, a to wszystko w toku postępu cywilizacyjnego, rosnących wielu gałęzi gospodarki w tym przemysłu ciężkiego. Jak pisze A. Wieloński, niekorzystnie na środowisko oddziałuje działalność komunikacyjna oraz urbanizacyjna. Współczesne rolnictwo, na skutek wykorzystywania nawozów sztucznych, również ma negatywny wpływ. Należy tu również wspomnieć o turystyce. Jednakże, najbardziej szkodliwy dla środowiska naturalnego jest przemysł. W szczególności należy tu wymienić górnictwo, hutnictwo, przemysł cementowy

oraz elektroenergetyczny. Przemysł jest działem gospodarki, którego głównym celem jest eksploatacja, a następnie przetwarzanie zasobów przyrody na masową skalę. Natomiast środowisko składa się z czynników, które są ze sobą wzajemnie powiązane. Zatem degradację środowiska należy rozpatrywać pod kątem zależności, w wyniku których zaburzenie jednego czynnika oddziałuje na funkcjonowanie całego środowiska. [33]

Rozwój przemysłu skutkuje negatywnym wpływem na bioróżnorodność. Spowodował także degradację składników przyrody nieożywionej tj. wody, powietrza, ukształtowania terenu oraz gleby. Wyeliminowanie wszystkich zanieczyszczeń środowiska jest niemożliwe. Lecz konieczne jest podejmowanie działań ograniczających emisję szkodliwych gazów do atmosfery i innych form zanieczyszczeń [34].

Priorytetem rozwojowym współczesnych europejskich gospodarek i społeczeństw jest zrównoważony rozwój. Termin ten pochodzi z leśnictwa. Pierwotnie odnosił się do sposobu gospodarowania lasem tj. wycina się tylko tyle drzew, ile może w to miejsce urosnąć, by las zawsze mógł się odbudować. Zrównoważony rozwój charakteryzuje się tym, iż wykorzystywanie zasobów naturalnych postępuje wolniej niż ich odtwarzanie, natomiast zasobów nieodnawialnych wolniej, niż wprowadzanie substytutów. Zrównoważony rozwój opiera się na rozwoju gospodarczym, który jest zgodny z przyrodniczym i społecznym otoczeniem. Rozwój ten jest uzasadniony ekonomicznie, pożądan społecznie. Termin ten przyjęło wielu badaczy [35].

Od 1973 r. Komisja Europejska ogłasza wieloletnie programy działań w zakresie środowiska (EAP), w których wymienia się przyszłe wnioski ustawodawcze i cele unijnej polityki ochrony środowiska. W maju 2022 r. wszedł w życie 8. EAP (Environment Action Programme, 8. Program działań w zakresie środowiska), jako prawnie uzgodniony przez UE wspólny program na rzecz polityki ochrony środowiska do końca 2030 roku [36]. Przypomina o zobowiązaniu UE do realizacji wizji siódmego EAP na 2050 roku, tj. zapewnienie wszystkim dobrostanu, jednocześnie respektując ograniczenia planety. Ww. program wskazuje wręcz na ważną korelację pomiędzy dobrostanem i dobrobytem człowieka, który jest zależny od zdrowego ekosystemu, w którym funkcjonujemy. Ósmy program działań w zakresie środowiska opierający się o założenia EZŁ (Europejskiego Zielonego Ładu) wskazuje sześć priorytetów, m.in.: dążenie do modelu regeneracyjnego wzrostu, uniezależnienie wzrostu gospodarczego od wykorzystania zasobów i degradacji środowiska oraz przyspieszenie przejścia na gospodarkę o obiegu zamkniętym oraz ochrona, zachowanie i przywrócenie różnorodności biologicznej oraz wzmocnienie kapitału

naturalnego (zwłaszcza powietrza, wody, gleby oraz ekosystemów leśnych, słodkowodnych, podmokłych i morskich).

Parlament Europejski 10 listopada 2022 r. przyjął dyrektywę w sprawie sprawozdawczości w zakresie zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstw (CSRD – Corporate Sustainability Reporting Directive). CSRD wymaga od firm regularnego ujawniania informacji niefinansowych o ich wpływie społecznym i środowiskowym. [37] ESG (Environmental, Social Responsibility, Corporate Governance) to zestaw czynników biznesowych (środowiskowych, społecznych i ładu korporacyjnego), które dają całościowy obraz danej firmy. Dyrektywa CSRD przewiduje zharmonizowane ramy sprawozdawczości niefinansowej tzw. ESRS (europejskie standardy sprawozdawczości w zakresie zrównoważonego rozwoju). Ostateczna wersja 12 standardów została przekazana Komisji Europejskiej przez EFRAG (Europejską Grupę Doradczą ds. Sprawozdawczości Finansowej) w dniu 22 listopada 2022 r.

Przyjęte przez Unię Europejską dyrektywa CSRD wskazuje, iż jednostka powinna ujawniać istotne informacje dotyczące zrównoważonego rozwoju, w tym:

- 3 warstwy: niezależne od sektora, specyficzne dla danego sektora oraz specyficzne dla danego podmiotu;
- 3 obszary raportowania: strategia, wdrożenie, pomiar efektów;
- 3 tematy: środowiskowe, społeczne, dotyczące ładu korporacyjnego.

XXI wiek często nazywany jest stuleciem ekologicznym, bowiem świadomość społeczeństwa dotycząca ekologii zdecydowanie wzrosła w przeciągu ostatniej dekady.

„Polityka i strategia rozwoju gospodarczego i społecznego, realizowanego bez szkody dla jakości środowiska i zasobów naturalnych, dotyczy również budownictwa. Cykl życia technicznego obiektu budowlanego, z uwzględnieniem kosztów środowiskowych poniesionych w procesie inwestycyjnym i eksploatacyjnym, powinien być przedmiotem oceny ekologicznej” [38]. Należy podkreślić, iż działalność budownicza wpływa na degradację środowiska na dwa sposoby:

- zanieczyszczenie wody, gleby, powietrza odpadami stałymi, ciekłymi i pyłowymi podczas procesu eksploatacji i utylizacji obiektów budowlanych po okresie życia technicznego;
- poprzez pobór surowców naturalnych, tj. woda, kopaliny, nośniki energii [38].

Należy podkreślić, iż budynek ekologiczny jest rozumiany jako obiekt, którego proces inwestycyjny został oparty na założeniach „rozwoju zrównoważonego”, czyli przy

poszanowaniu „zasobów, walorów i procesów środowiska naturalnego”. Rozpatrując powyższe uwarunkowania w odniesieniu do tzw. okresu życia technicznego obiektu, zarówno w procesie projektowania, wykonania, eksploatacji, jak i przewidywanego sposobu utylizacji po osiągnięciu stanu granicznego użytkowania, podstawowym kryterium budownictwa ekologicznego jest oszczędność surowców naturalnych tj. nośników energii, wody, surowców wykorzystywanych bezpośrednio do produkcji materiałów czy wyrobów budowlanych [38].

Przemysł budowlany ze względu na obieg materiałów budowlanych jak i ogromną ilość odpadów, angażuje ogromną ilość zasobów naturalnych. Wynikiem takiego procesu są problemy nie tylko środowiskowe, ale i społeczne. Dlatego właśnie to firmy budowlane ogrywają kluczową rolę w zrównoważonym rozwoju. Ważne jest znalezienie nowych sposobów i metod działalności budowlanej, która będzie wykorzystywała materiały wielokrotnie przetwarzalne oraz zapewni realizację interesów ekonomicznych wszystkich interesariuszy zaangażowanych w rozwój projektów budowlanych. [39]

Czynnikami pozytywnie wpływającymi na marnotrawstwo zasobów naturalnych jest redukcja ponowne użycie i recykling czyli tzw. strategia 3R obejmująca:

- zmniejszenie zapotrzebowania na materiały wykonane z surowców pierwotnych,
- zmniejszone zużycie energii do transportu odpadów i produkcji surowców,
- usuwanie odpadów, które w przeciwnym razie znalazłyby się na składowisku [39]

Materiał budowlany, który może być uznawany za nieszkodliwy, ma znaczący wpływ na środowisko, jeśli dokona się analizy wszystkich etapów jego cyklu życia:

- wydobywanie
- przygotowanie surowców
- produkcję
- transport do miejsca sprzedaży
- użytkowanie
- rozkład

Dlatego tak ważne jest zrównoważone projektowanie wyrobów budowlanych, aby zapewnić planowaną i konsekwentną realizację działań organizacyjnych, prawnych i technicznych w oparciu o wybrane parametry o charakterze środowiskowym i zasobowym opartym na zintegrowanym modelu zarządzania środowiskowego i ekonomicznego.

Pozwoli to na zapewnienie minimalnych kosztów środowiskowych dla danego i istniejącego rozwoju produktów budowlanych. [39]

Aby przyczynić się do ograniczenia emisji pochodzących z transportu, konieczne jest coraz częstsze korzystanie z transportu kolejowego, ponieważ jest to jedna forma transportu o najniższej emisji. Niestety kolej nie jest jej całkowicie pozbawiona, jednym z najwyższych źródeł emisji jest infrastruktura kolejowa, a zwłaszcza podkłady kolejowe. [27]

Podkłady kolejowe według klasyfikacji opartej na materiale, dokonanej w pierwszym rozdziale dzielimy na drewniane, betonowe i stalowe.

Podkłady kolejowe, które są wykonane z drewna, nasączone są kreozotem i należy je jak najszybciej zastąpić. Faktem jest, że kreozot jest toksyczną, rakotwórczą substancją, która jest mutagenna i wysoce rakotwórcza, gdy jest obecna w żywych organizmach. [40] Kreozot służy do impregnacji drewnianych podkładów i podrozjezdnic, słupów energetycznych, mostów, elementów konstrukcji nabrzeży i innych konstrukcji inżynierskich. Impregnowane tym olejem podkłady, zawierają substancje silnie toksyczne, takie jak antracen, fluoren (difenylometan), fenantren, benzo(a)antracen, benzo(a)piren, które zaliczane są do odpadów niebezpiecznych (kod 170204\*) mogą zawierać duże ilości substancji rakotwórczych. [40]

Na rynku dostępnych jest niewiele alternatywnych technologii utylizacji drewna nasyconego kreozotem, ale są one drogie, a sam proces utylizacji skomplikowany. Dodatkowo prawo zabrania i unieszkodliwiania tego typu odpadów poza obiektami lub urządzeniami do tego przeznaczonymi. Transport i utylizacja powinny być przeprowadzane wyłącznie przez profesjonalne firmy posiadające wszelkie niezbędne uprawnienia i zezwolenia. Pod żadnym pozorem nie wolno przekazywać używanych podkładów osobom trzecim w celu ich dalszego wykorzystania. [40]

Natomiast podkłady betonowe według warunków technicznych wykonania i odbioru, które stanowią załącznik do uchwały nr 106/2020 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 11 lutego 2020 roku powinny być wykonane z:

- cementu,
- kruszywa, zawierającego w sobie piasek zwykły, żwir wielofrakcyjny, grys marki 50 ze skał magmowych lub metamorficznych,
- wody,
- stali zbrojeniowej,
- dopuszczalne jest stosowanie domieszek uplastyczniająco-upłynniających mieszankę betonową zgodnie z PN-EN 206-1:2003. [41]

Wytwarzanie cementu składa się z trzech elementów procesu produkcyjnego:

- wydobycia surowca
- wypału klinkieru w piecu obrotowym
- przemiału klinkietu z dodatkami [42]

Cement jako produkt jest wynikiem wydobywania i przetwarzania materiałów pochodzących z nieodnawialnych zasobów naturalnych tym samym naruszając bioróżnorodność. Przemysł wydobywczy surowców nieenergetycznych musi działać w ramach przepisów Unii Europejskiej dotyczących ochrony środowiska w tym Dyrektywy Siedliskowej, jak i Ptasiej. [43]

Wydobywanie surowców ma przeważnie negatywny wpływ na obszar, z którego są wydobywane. Rodzaj i stopień oddziaływania na środowisko i bioróżnorodność różnią się znacznie dla każdego miejsca i zależy od szeregu czynników. Dlatego są one ustalane indywidualnie dla każdego przypadku. Potencjalnymi negatywnymi skutkami wydobycia kruszców są:

- utrata siedlisk i ich degradacja
- zakłócenie i przemieszczanie gatunków
- zakłócenia hydrauliczne (modyfikacja warunków wodnych)
- zmiany jakości wody [43]

Jak wynika z analizy literatury, aby rozwijać gospodarkę przy jednoczesnej ochronie środowiska, konieczne jest projektowanie polityk opartych na koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Takie założenia recyklingu i odzysku wymagają od społeczeństwa racjonalnej i ekologicznej postawy wobec wytwórców wyrobów, a wytwórcy wyrobów powinni uwzględniać tę koncepcję już na etapie projektowania. Tutaj zasadnym jest wprowadzanie do obrotu podkładów polimerowych wykonanych z polietylenu z uwagi na ich przetwarzalność przy zachowaniu właściwości materiału [46]. Zachowanie właściwości może się odbyć również poprzez wzmocnienia chemiczne polietylenów [51] ale wciąż przyjazne dla środowiska. Niestety technologia recyklingu polimerów wzmocnianych włóknami szklanymi czy węglowymi wciąż nie jest dobrze rozwinięta w Polsce a wymaga wysokich nakładów [50]. Na dzień dzisiejszy w literaturze znajdujemy wiele możliwości recyklingu mieszanek polimerowych [52], [53], [54], [55], [61], które wskazują, że recykling kompozytów polimerowych pobudzi gospodarkę o obiegu zamkniętym [57].

#### 1.4. Aspekty prawne

Kluczowym dla wdrożeniowego charakteru pracy jest zestawienie prawnych aspektów dotyczących możliwości zastosowania podkładów polimerowych na rynku polskim jak również zaproponowanie ścieżki wdrożenia dla firmy Infra Silesia S.A.

##### 1.4.1. Charakter prawny podkładu polimerowego

Chcąc dokonać analizy prawnych aspektów możliwości wykorzystania podkładów polimerowych w transporcie kolejowym w pierwszej kolejności należałoby określić charakter prawny takiego podkładu. Zgodnie z art. 2 pkt 1 rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiającego zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylającego dyrektywę Rady 89/106/EWG przez „wyrób budowlany” rozumie się każdy wyrób lub zestaw wyprodukowany i wprowadzony do obrotu w celu trwałego wbudowania w obiektach budowlanych lub ich częściach, którego właściwości wpływają na właściwości użytkowe obiektów budowlanych w stosunku do podstawowych wymagań dotyczących obiektów budowlanych. Z kolei jak stanowi art. 2 pkt 3 Rozporządzenia 305/2011 obiektem budowlanym są budynki i budowle. Przez budowle należy rozumieć każdy obiekt budowlany niebędący budynkiem lub obiektem małej architektury, m.in. obiekty liniowe. Obiektem liniowym jest natomiast obiekt budowlany, którego charakterystycznym parametrem jest długość, m.in. drogi kolejowe.

Zważając na powyżej przytoczone regulacje w należy stwierdzić, że podkłady polimerowe, które stanowiłyby część wbudowaną w obiekt budowlany, jakim są linie kolejowe, powinny zostać zakwalifikowane jako wyrób budowlany, o którym mowa w Rozporządzeniu 305/2011. Opierając dalsze rozważania na powyższej tezie przedstawiono formalnoprawne warunki użycia podkładów polimerowych na liniach kolejowych oraz bocznicach.

#### 1.4.2. Wprowadzenie do obrotu oraz dopuszczenie do eksploatacji podkładów polimerowych jako wyrobu budowlanego

Zgodnie z art. 2 pkt 10 ustawy z dnia 16 kwietnia 2004 r. o wyrobach budowlanych, przez wprowadzenie do obrotu należy rozumieć wprowadzenie do obrotu, o którym mowa w art. 2 pkt 17 Rozporządzenia 305/2011, czyli udostępnienie po raz pierwszy wyrobu budowlanego na rynku unijnym.

Z kolei zgodnie ze stanowiskiem Prezesa UTK „przez wprowadzenie do obrotu należy rozumieć udostępnienie wyrobu na rynku po raz pierwszy. Wprowadzeniem do obrotu będzie zatem dostarczenie do składu zarządcy infrastruktury podkładów kolejowych przez ich producenta.”

Aby możliwym było rozpoczęcie użytkowania podkładów polimerowych w transporcie kolejowym (na liniach kolejowych), koniecznym jest doprowadzenie do dopuszczeniu całego podsystemu do eksploatacji. Ten proces składa się z dwóch etapów, tj. wprowadzenia do obrotu - o którym wspomniano powyżej - wyrobu wbudowanego (w tym przypadku podkładu polimerowego) w podsystem oraz weryfikacji bezpiecznej integracji tego wyrobu z podsystemem. Za pierwszy z tych etapów odpowiedzialny jest producent wyrobu, z kolei ciężar wynikający z drugiego etapu spoczywa na producencie podsystemu. Jak wskazuje Prezes UTK „procedury oceny zgodności wyrobów są nierozdzielnie związane z oceną zgodności podsystemów z nich złożonych i szerzej, z procedurami dopuszczania podsystemów do eksploatacji.”

W systemie oceny zgodności można wyróżnić wyroby, których weryfikacja zgodności opiera się na wymaganiach europejskich lub krajowych. Dlatego też w dalszej części przedstawiono ten podział z uwzględnieniem różnic w zakresie dopuszczenia do obrotu oraz eksploatacji podkładów polimerowych, które miałyby stanowić część podsystemu na liniach kolejowych objętych wymaganiami Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności (dalej: „TSI”) oraz liniach kolejowych nieobjętych TSI i bocznicach.



a. Linie kolejowe objęte wymaganiami TSI oraz bocznie niebędące infrastrukturą prywatną, w tym dopuszczone do eksploatacji przed 28.VII.2021 r., które podlegają modernizacji lub odnowieniu

Procedura wprowadzenia do obrotu oraz dopuszczenia do eksploatacji podkładów polimerowych w przypadku ich wykorzystania na liniach kolejowych objętych wymaganiami TSI została ustanowiona na poziomie przepisów europejskich.

W oparciu o TSI dla podsystemu „Infrastruktura” składnikami interoperacyjności mogą być zgodnie z pkt 5.2 Załącznika do TSI „Infrastruktura” „tylko następujące elementy, niezależnie od tego, czy są to poszczególne części składowe, czy podzespoły toru: c) podkłady.” W pkt 5.1. ppkt 1 Załącznika zostało wskazane, że „wymagania określone w pkt 5.3 dotyczą tradycyjnej konstrukcji toru na podsypce tłuczniowej z szyną Vignoles'a na betonowych lub drewnianych podkładach i przytwierdzeniach zapewniających opór przed przemieszczeniem wzdłużnym szyny dzięki przytwierdzeniu stopki szyny.” W pkt 5.2. ppkt 3 Załącznika „szyny, przytwierdzenia i podkłady stosowane na krótkich odcinkach toru do szczególnych celów, na przykład na rozjazdach i skrzyżowaniach, w urządzeniach kompensujących rozszerzalność toru, płytach przejściowych i budowach specjalnych, nie są uznawane za składniki interoperacyjności.” Wobec powyższego należy wskazać, że podkłady polimerowe nie stanowią składnika interoperacyjności, a zatem nie znajdują do nich zastosowania zasady TSI „Infrastruktura”.

Zatem w związku z tym, że podkłady polimerowe nie zostały ujęte w TSI „Infrastruktura” jako składniki interoperacyjności należy dalszych wytycznych poszukiwać na gruncie prawa krajowego. Odnosząc się do wykazu rodzajów budowli, urządzeń oraz pojazdów kolejowych, dla których wymagane jest uzyskanie świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu zawartego w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 13 maja 2014 r. w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych należy stwierdzić, że ww. obowiązkiem zostały objęte wyłącznie sytuacje, gdy:

- została wydana decyzja o przyznaniu odstępstwa od obowiązku stosowania TSI;
- zachodzi szczególny przypadek zdefiniowany w TSI.

W tej sytuacji przepisy krajowe nie nakładają na producenta podkładów polimerowych obowiązku uzyskania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu budowli, a regulacje europejskie (tj. TSI „Infrastruktura”) wyłącza je ze składników interoperacyjności.

Innymi słowy w przypadku wykorzystania podkładów polimerowych na liniach kolejowych objętych wymaganiami TSI w celu wprowadzenia ich do obrotu, a następnie dopuszczenia do eksploatacji zastosowanie znajdują ogólne zasady oceny zgodności (Rysunek 19).

W takim przypadku to do producenta należy wybór specyfikacji, które umożliwią spełnienie zasadniczych wymagań interoperacyjności dla TSI „Infrastruktura” wobec jego wyrobu (np. podkładu polimerowego).



*Rysunek 19. Schemat dopuszczenia podkładu innowacyjnego do eksploatacji*

Chcąc wprowadzić do obrotu dany typ urządzeń lub typ budowli, które nie zostały ujęte w TSI „Infrastruktura” jako składnik interoperacyjności należy przeprowadzić następującą procedurę:

- 1) Przeprowadzenie oceny zgodności wyrobu;
- 2) Wystawienie przez producenta wyrobu deklaracji zgodności.

Przeprowadzenie oceny zgodności nastąpi na podstawie ustawy z dnia 13 kwietnia 2016 r. o systemach oceny zgodności i nadzoru rynku.

Na podstawie art. 7 ust. 1 ww. ustawy „obowiązkowej ocenie zgodności przed wprowadzeniem do obrotu lub oddaniem do użytku podlegają wyroby, dla których określono wymagania w bezpośrednio stosowanym unijnym prawodawstwie harmonizacyjnym lub przepisach wdrażających unijne prawodawstwo harmonizacyjne, w tym w przepisach wydanych na podstawie art. 12.” Tym samym, skoro Ustawa o wyrobach budowlanych określa zasady wprowadzenia do obrotu wyrobów budowlanych, do których zalicza się podkład polimerowy, to nie ulega wątpliwości, że przed wprowadzeniem go do obrotu należy dokonać oceny jego zgodności.

Wprowadzenie do obrotu może nastąpić na trzy sposoby:

1. Oznakowanie CE
2. Krajowa deklaracja zgodności (znak budowlany)

3. Legalne wprowadzenie w innym państwie członkowskim UE lub państwie członkowskim EFTA.

Po wprowadzeniu do obrotu danego wyrobu, a przed rozpoczęciem jego eksploatacji koniecznym jest zabudowanie go w podsystemie, a następnie sprawdzenie jego bezpiecznej integracji w podsystemie. Za ten etap odpowiedzialny jest producent podsystemu.

Zatem po przeprowadzeniu tych dwóch etapów, czyli wprowadzenia do obrotu wyrobu, a następnie oceny zgodności podsystemu możliwe jest dopuszczenie całego podsystemu do eksploatacji.

Innym rozwiązaniem dla wprowadzenia do obrotu podkładów polimerowych jest skorzystanie ze ścieżki dla tzw. „rozwiązań nowatorskich”. Zgodnie z Art. 10 rozporządzenia Komisji (UE) nr 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczącego technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej (TSI Infrastruktura):

1. Aby dotrzymać tempa postępowi technicznemu, konieczne mogą okazać się rozwiązania nowatorskie, które nie spełniają specyfikacji określonych w załączniku lub dla których nie można zastosować metod oceny określonych w załączniku.
2. Rozwiązania nowatorskie mogą dotyczyć podsystemu "Infrastruktura", jego części i jego składników interoperacyjności.
3. Jeżeli proponowane jest rozwiązanie nowatorskie, producent lub jego upoważniony przedstawiciel mający siedzibę w Unii określają, w jaki sposób odbiega ono od odpowiednich przepisów niniejszych TSI lub je uzupełnia, i przedstawiają te odstępstwa Komisji w celu dokonania analizy. Komisja może zażądać opinii Europejskiej Agencji Kolejowej (Agencja) na temat proponowanego rozwiązania nowatorskiego.
4. Komisja wydaje opinię w sprawie proponowanego rozwiązania nowatorskiego. Jeżeli opinia jest pozytywna, opracowuje się odpowiednie specyfikacje funkcjonalne, specyfikacje interfejsów oraz metodę oceny, jakie należy uwzględnić w TSI w celu umożliwienia stosowania takiego rozwiązania nowatorskiego, a następnie wprowadza się je do TSI w ramach procesu przeglądu prowadzonego na podstawie art. 6 dyrektywy 2008/57/WE [aktualnie art. 5 dyrektywy 2016/797]. Jeżeli opinia jest negatywna, nie można zastosować proponowanego rozwiązania nowatorskiego.

5. Do czasu dokonania przeglądu TSI pozytywna opinia wydana przez Komisję uznawana jest za dopuszczalny środek zapewnienia zgodności z wymaganiami zasadniczymi określonymi w dyrektywie 2008/57/WE i może być stosowana do oceny podsystemu.

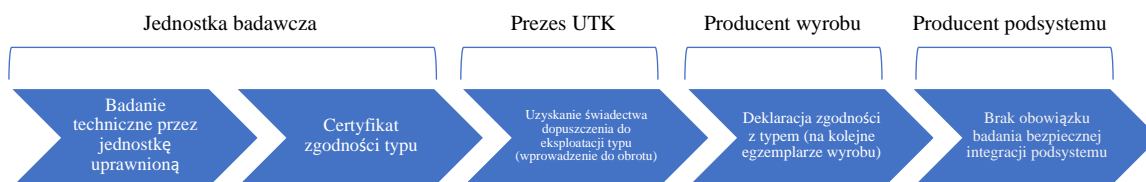
b. Linie kolejowe nieobjęte wymaganiami TSI oraz bocznic kolejowe będące infrastrukturą prywatną, a także bocznic niebędące infrastrukturą prywatną, dopuszczone do eksploatacji przed 28.VII.2021 r., które nie podlegają modernizacji czy odnowieniu.

Odmienna będzie z kolei procedura wprowadzenia do obrotu oraz dopuszczenia do eksploatacji podkładów polimerowych w przypadku ich wykorzystania na liniach kolejowych nieobjętych wymaganiami TSI oraz bocznicach kolejowych będących infrastrukturą prywatną, a także bocznicach niebędących infrastrukturą prywatną, dopuszczonych do eksploatacji przed 28.VII.2021 r., i które nie podlegają po tej dacie modernizacji lub odnowieniu. W takiej sytuacji zastosowanie będą miały przepisy ustawy z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym. Art. 22f ust. 1 u.t.k. wskazuje bowiem, że warunkiem dopuszczenia do eksploatacji typów budowli i typów urządzeń mających wpływ na poziom bezpieczeństwa ruchu kolejowego, o których mowa w przepisach wydanych na podstawie ust. 14 pkt 2, jest uzyskanie świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu dla pierwszego ich egzemplarza. Jak wskazuje ust. 14 pkt 2 ww. przepisu minister właściwy do spraw transportu określi, w drodze rozporządzenia wykaz rodzajów budowli, urządzeń oraz pojazdów kolejowych, dla których wymagane jest uzyskanie świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu. Aktem wykonawczym zawierającym powyższy wykaz jest Rozporządzenie 2014.

Zatem powyższa procedura odnosić się będzie zarówno do podkładów kolejowych wykorzystywanych na liniach kolejowych nieobjętych wymaganiami TSI, jak również wyżej wymienionych bocznicach kolejowych. Zgodnie bowiem z § 7 pkt 1 lit. c Rozporządzenia 2014, w przypadkach, o których mowa w art. 25d ust. 1 pkt 2 i art. 25f u.t.k. (tj. sieci kolejowych objętych dyrektywą o interoperacyjności w przypadku, gdy nie zawiera w tym zakresie wymagań oraz przyznania odstępstw od obowiązku stosowania TSI), świadectwo dopuszczenia do eksploatacji typu jest wydawane na każdy typ podkładu kolejowego. Z kolei jak wskazuje § 10 pkt 1 lit. c) i § 11 pkt 1 lit. c) Rozporządzenia 2014 również w przypadku bocznic kolejowych oraz infrastruktury prywatnej świadectwo dopuszczenia do eksploatacji typu jest wydawane na każdy typ podkładu kolejowego.

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

Tym samym powyższe przepisy wprowadzają procedurę oceny zgodności budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych, których zasady wprowadzenia do obrotu i dopuszczenia do eksploatacji nie zostały ustanowione na poziomie przepisów europejskich.



*Rysunek 20. Schemat dopuszczenia podkładu innowacyjnego do eksploatacji*

Chcąc wprowadzić dany wyrób kolejowy (nie objęty wymaganiami TSI) do obrotu należy przeprowadzić następującą procedurę (Rysunek 20.):

- 1) Badanie techniczne wyrobu kolejowego przez jednostkę organizacyjną uprawnioną przez Prezesa UTK do wykonania badań technicznych,
- 2) Wydanie przez ww. jednostkę certyfikatu zgodności typu,
- 3) Wydanie przez Prezesa UTK świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu (wprowadzenie do obrotu danego wyrobu kolejowego).

W przypadku kolejnych egzemplarzy urządzeń lub budowli kolejowych zgodnych z typem uznaje się je za dopuszczone do eksploatacji, gdy:

- 1) producent wystawił deklarację zgodności z typem (po przeprowadzeniu procedury oceny zgodności z typem) albo
- 2) podmiot zamawiający, wykonawca modernizacji, importer, inwestor, dysponent, zarządca, użytkownik bocznic lub przewoźnik kolejowy wystawił deklarację zgodności z typem (po przeprowadzeniu badań technicznych przez jednostkę organizacyjną uprawnioną przez Prezesa UTK i wydaniu przez nią certyfikatu zgodności z typem).

Jak wskazuje J. Siudecki „procedura oceny zgodności uregulowana w art. 22f opiera się na ocenie typu wyrobu, czyli rozwiązania konstrukcyjnego powtarzanego w toku produkcji seryjnej.”

Nie bez znaczenia jest tu również zasada wzajemnego uznania ustanowiona w Rozporządzeniu 2019/515, która określa, że „swobodny przepływ towarów zapewnia się na rynku wewnętrznym poprzez harmonizację na poziomie Unii przepisów określających wspólne wymogi w zakresie wprowadzania do obrotu określonych towarów lub - w odniesieniu do towarów lub aspektów towarów nieobjętych w całości zakresem przepisów harmonizacyjnych Unii - poprzez stosowanie zasady wzajemnego uznawania określonej

przez Trybunał Sprawiedliwości Unii Europejskiej. (...) Dobrze działająca zasada wzajemnego uznawania stanowi istotne uzupełnienie harmonizacji przepisów na poziomie Unii, szczególnie przy uwzględnieniu, że wiele towarów ma aspekty zarówno zharmonizowane, jak i niezharmonizowane.”

Procedura wydania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu stanowi bowiem procedurę uprzedniego zezwolenia, na którą wskazuje art. 3 pkt 7) Rozporządzenia 2019/515. Zgodnie z tym przepisem przez "procedurę uprzedniego zezwolenia" rozumie się procedurę administracyjną przewidzianą w prawie państwa członkowskiego, zgodnie z którą od właściwego organu tego państwa członkowskiego wymaga się - na podstawie wniosku złożonego przez podmiot gospodarczy - wydania formalnego zezwolenia przed umożliwieniem udostępnienia towarów na rynku tego państwa członkowskiego.

Jak wskazano w doktrynie prawa „zasada wzajemnego uznawania zawarta w rozporządzeniu 2019/515 oznacza, że wydając świadectwo dopuszczenia do eksploatacji typu, Prezes UTK nie może żądać spełnienia krajowych przepisów technicznych, jeżeli urządzenie, budowla i pojazd zostały zgodnie z prawem wprowadzone do obrotu w innym państwie członkowskim, chyba że istnieją uzasadnione względy interesu publicznego uzasadniające zastosowanie konkretnego krajowego przepisu technicznego.”

Odzwierciedla powyższą zasadę regulacja § 17 Rozporządzenia 2014, która wskazuje, że na wniosek podmiotu ubiegającego się o wydanie świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu zakres badań technicznych, o których mowa w rozdziale 4 (tj. badanie zgodności z wymaganiami określonymi we właściwych, dla danego typu budowli, specyfikacjach technicznych i dokumentach normalizacyjnych, badanie zgodności z warunkami technicznymi, określonymi w przepisach o warunkach technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie oraz analiza wyników prób eksploatacyjnych), może być ograniczony przez Prezesa UTK, w przypadku gdy typ spełnia następujące warunki:

- 1) posiada certyfikaty uprawnionych jednostek badawczych krajowych lub mających siedzibę na terytorium państw członkowskich Unii Europejskiej,
- 2) był badany zgodnie z zakresem wymienionym w rozporządzeniu, posiada raporty potwierdzające pozytywne wyniki badań i jest eksploatowany na terytorium państw członkowskich Unii Europejskiej,
- 3) posiada pozytywne opinie użytkowników z dotychczasowej eksploatacji, lub
- 4) typ pojazdu kolejowego jest przeznaczony do modernizacji.

Zatem w przypadku spełnienia przez dany typ ww. warunków producent ubiegający się o świadectwo dopuszczenia do eksploatacji typu może otrzymać je bez przeprowadzania badań technicznych.

Do oceny zgodności wyrobów stosuje się – zgodnie z art. 10 ust. 3a u.t.k. – przepisy ustawy o systemach oceny zgodności i nadzoru rynku.

Jednakże analizując powyższe regulacje należy stwierdzić, że procedura oceny zgodności, o której mowa powyżej, charakteryzuje się brakiem określenia konkretnych, wskazanych wprost przesłanek warunkujących uznanie zgodności danego wyrobu – tj. budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych. Pośrednio doszukiwać się jej można jedynie w treści art. 22f ust. 1 u.t.k., który wskazuje na dopuszczenie do eksploatacji typów budowli i typów urządzeń mających wpływ na poziom bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Tym samym można uznać, że kluczowym warunkiem uznania ich zgodności jest osiągnięcie wymagań ich bezpieczeństwa.

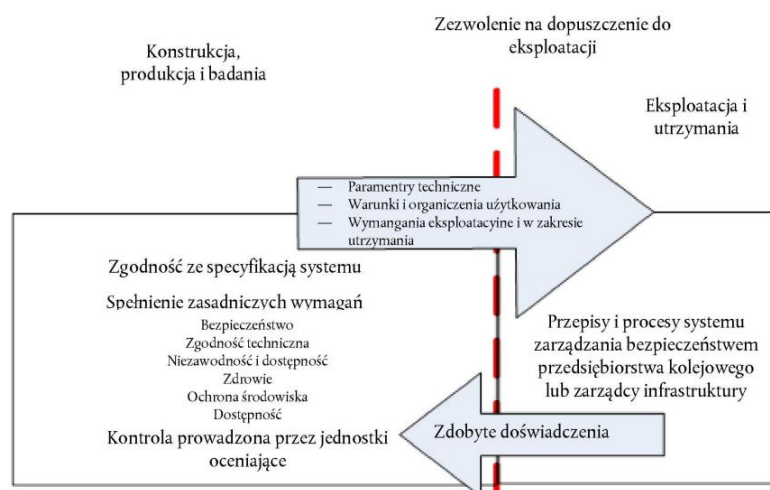
Świadectwo dopuszczenia do eksploatacji typu potwierdza zgodność urządzeń i budowli w momencie ich wprowadzenia do obrotu, a nie oddania do eksploatacji. Innymi słowy nie potwierdza ono, że dany wyrób może być bezpiecznie dopuszczony do eksploatacji. W konsekwencji bezpieczna integracja danego wyrobu w ramach podsystemu jest wyłączną odpowiedzialnością producentów podsystemów – niepoprzedzoną koniecznością przeprowadzenia bezpiecznej integracji podsystemów w oparciu o oceny ryzyka. Taka konstrukcja przepisów krajowych skutkuje ryzykiem obniżenia bezpieczeństwa technicznego podsystemów wykorzystywanych w transporcie kolejowym.

Z jednej strony producent podsystemów, jako podmiot, który na gruncie krajowych przepisów dopuszcza wyrób do eksploatacji, ponosi odpowiedzialność za bezpieczną integrację podsystemów, mimo że w rzeczywistości nie jest obowiązany do zbadania poziomu bezpieczeństwa ww. integracji podsystemów. Z drugiej strony zgodnie z art. 22e ust. 1a pkt 3 u.t.k. podsystem strukturalny może być dopuszczony do eksploatacji, jeżeli urządzenia i budowle, które wchodzą w jego skład, zostały dopuszczone do eksploatacji zgodnie z przepisami ustawy, co wskazuje, że jeżeli wszystkie elementy wchodzące w skład podsystemu otrzymały świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu (lub kolejne egzemplarze – deklarację zgodności z typem) to producent podsystemu może pominąć badanie bezpiecznej integracji podsystemu w ramach procedury dopuszczenia podsystemu do eksploatacji. Tak ukształtowane przepisy niejako rozmywiają odpowiedzialność za bezpieczną integrację podsystemów. Chcąc jednak dołożyć należytej staranności w tym

zakresie producent podsystemów może posiłkować się jedynie zaleceniami Komisji z dnia 5 grudnia 2014 r. w sprawie kwestii związanych z dopuszczaniem do eksploatacji i użytkowaniem podsystemów strukturalnych i pojazdów na podstawie dyrektyw Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/57/WE i 2004/49/WE. Zgodnie z zawartą w nich definicją "bezpieczna integracja" oznacza działanie mające na celu zapewnienie, aby włączenie elementu (np. nowego typu pojazdu, projektu sieci, podsystemu, części, elementu składowego, składnika, oprogramowania, procedury, organizacji) do większego systemu nie spowodowało niedopuszczalnego ryzyka w odniesieniu do otrzymanego systemu.

System kolei to złożony technicznie układ, którego bezpieczna integracja wymaga uwzględnienia wszystkich zagrożeń i sprawdzenia interfejsów w danym, rzeczywistym środowisku technicznym. Nie sposób więc dokonywać dopuszczenia do eksploatacji w oderwaniu od tego środowiska technicznego. Nie sposób tym bardziej dopuszczać do eksploatacji jedynie określonego typu, będącego rozwiązaniem technicznym, a nie wyrobem podlegającym faktycznemu zainstalowaniu lub zabudowie w podsystemie. Nie zmienia tych wniosków fakt, że warunkiem uzyskania świadectwa są próby eksploatacyjne, gdyż bezpieczną integrację wykazuje się z istoty rzeczy w odniesieniu do każdego konkretnego, rzeczywistego przypadku.

Zgodnie z art. 3 zaleceń na Rysunku 21. zestawiono działania poprzedzające udzielenie zezwolenia na dopuszczenie do eksploatacji podsystemu strukturalnego oraz działania po tym następujące.



Rysunek 21. Schematyczny opis procesu zezwolenia na dopuszczenie do eksploatacji.

Podsumowując, procedura wprowadzenia do obrotu oraz dopuszczenia do eksploatacji podkładów polimerowych w przypadku ich wykorzystania na liniach kolejowych



nieobjętych wymaganiami TSI oraz bocznicach kolejowych będących infrastrukturą prywatną, a także bocznicach niebędących infrastrukturą prywatną, dopuszczonych do eksploatacji przed 28.VII.2021 r. i które nie podlegają po tej dacie modernizacji lub odnowieniu, będzie opierała się o krajowe regulacje zawarte w szczególności w art. 22f u.t.k. i będzie polegała na konieczności otrzymania przez producenta podkładu polimerowego świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu (lub dla kolejnych egzemplarzy – deklaracji zgodności z typem), a następnie dopuszczenia do eksploatacji jako element podsystemu przez jego producenta.

#### 1.4.3. Podsumowanie aspektów prawnych

Z przeprowadzonej analizy wynika, że należy rozróżnić dwa przypadki zabudowy podkładów polimerowych, zależnie od rodzaju infrastruktury, na której mają zostać zabudowane.

W przypadku inwestycji objętych wymaganiami Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności należy zauważyć, że zgodnie z Technicznymi Specyfikacjami Interoperacyjności dla podsystemu „Infrastruktura” składnikami interoperacyjności mogą być tylko podkłady betonowe lub drewniane. Natomiast zgodnie z rozporządzeniem Ministra Infrastruktury i Rozwoju w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych z dnia 13 maja 2014 r. (Dz. U., poz. 720), zwanym dalej „rozporządzeniem 720”, w przypadku linii kolejowych objętych obowiązkiem stosowania TSI, świadectwo dopuszczenia do eksploatacji wydaje się wyłącznie na podkłady stalowe. W efekcie przepisy krajowe nie nakładają obowiązku uzyskania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu budowli dla podkładów polimerowych, zaś z TSI Infrastruktura wynika, iż takich podkładów nie można uznać za składniki interoperacyjności. Oznacza to, że w przypadku linii objętych obowiązkiem stosowania TSI w odniesieniu do podkładów polimerowych obowiązują ogólne zasady oceny zgodności – producent sam wybiera adekwatne specyfikacje do zapewnienia, że jego wyrób umożliwi spełnienie zasadniczych wymagań interoperacyjności dla podsystemu „Infrastruktura”. Spełnienie wymagań przez podsystem jest następnie weryfikowane przez jednostkę notyfikowaną.

Istnieje także możliwość zastosowania wobec podkładów polimerowych ścieżki dopuszczenia przeznaczonej dla tzw. „rozwiązań nowatorskich” opisanej w art. 10 TSI Infrastruktura.

Odmienna będzie ścieżka dopuszczenia dla podkładów polimerowych w przypadku ich stosowania na liniach kolejowych nieobjętych TSI czy bocznicach kolejowych. W takiej sytuacji zastosowanie znajdują przepisy § 7 i 10 rozporządzenia 720, w których jest mowa o „podkładach kolejowych”, bez precyzowania materiału, z jakiego są one wykonywane.

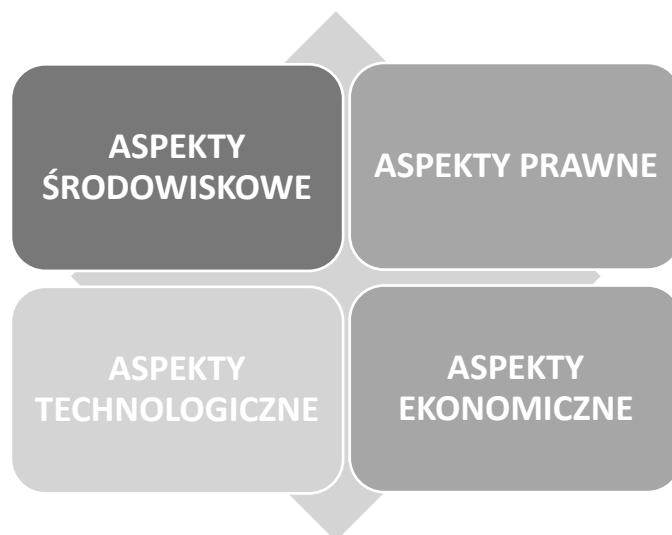
W efekcie należy uznać, że podkłady polimerowe stosowane w tych przypadkach są objęte obowiązkiem uzyskania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu budowli.

## **2. ZAŁOŻENIA BADAWCZE**

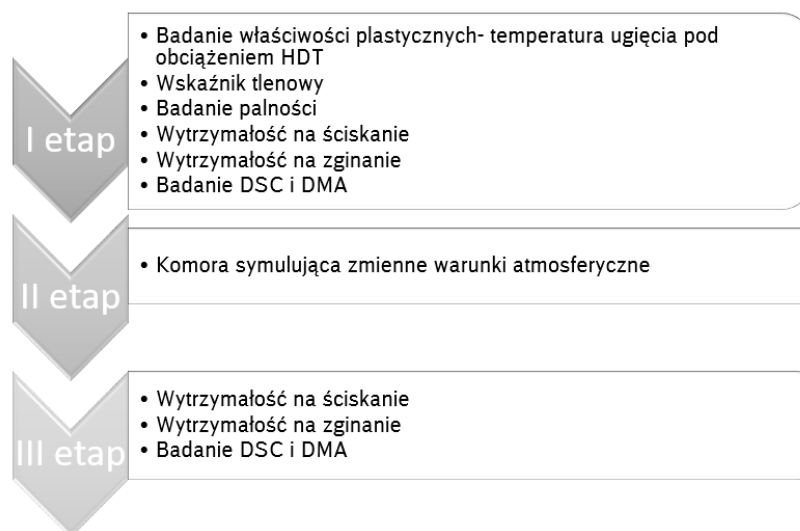
W niniejszej pracy ważnym dla przedsiębiorstwa DB Cargo Polska jest zbadanie czterech kluczowych aspektów innowacyjnych polimerowych podkładów kolejowych. W te 4 aspekty zaliczamy:

- aspekty technologiczne;
- aspekty ekonomiczne;
- aspekty środowiskowe;
- aspekty prawne.

Dla przedsiębiorstwa DB Cargo Polska oraz spółki Infra Silesia S.A. ważnym jest racjonalne połączenie tych wszystkich czterech aspektów (Rysunek 22). W aspektach technologicznych wykonano badania wytrzymałościowe i symulacje zgodnie z Rys. 23.



*Rysunek 22. Schematyczne przedstawienie analizowanych aspektów na potrzeby Przedsiębiorstwa.*



*Rysunek 23. Schemat kolejności wykonywania badań*

## 2.1. Przedmiot badań, sytuacja problemowa

W aspektach ekonomicznych ważnym jest zbadanie kosztów życia produktu dla 4 rozważanych przez firmę DB Cargo Polska rodzajów podkładów kolejowych. Analizowane podkłady to: drewniane, betonowe, polietylenowe oraz poliuretanowe. Celem badań w aspektach ekonomicznych będzie porównanie LCC oraz wskazanie przewagi konkurencyjnej pod kątem kosztowym na rzecz jednego z innowacyjnych polimerowych podkładów kolejowych (polietylenowe vs. poliuretanowe).

W aspektach środowiskowych ważnym jest zbadanie wpływu podkładów polietylenowych na środowisko naturalne jak również porównanie ich z tradycyjnymi podkładami kolejowymi. Celem badań w obszarze aspektów środowiskowych będzie rekomendacje jednego z dwóch typów rodzajów innowacyjnych polimerowych podkładów kolejowych. Istotność badań środowiskowych ujętych w pracy zależna jest od wielu czynników. Najważniejszym z nich jest dbałość o dobro środowiska i bioróżnorodności, a także o cyrkularność i cykl życia produktu budowlanego. W obecnym tempie postępu technologicznego, który ma niewątpliwie negatywny wpływ na środowisko naturalne, ważna jest weryfikacja wprowadzania nowych technologii pod kątem oddziaływania na środowisko i życie i zdrowie człowieka.

Dla firmy DB Cargo Polska, której częścią jest spółka InfraSilesia S.A, ważna jest dbałość o środowisko poprzez wdrażanie nowych rozwiązań i ulepszanie dotychczasowych mechanizmów z myślą o redukcji śladu węglowego i ochronie klimatu. Co więcej, firma uwzględnia aspekty związane z ochroną środowiska i zrównoważonym rozwojem poprzez działania związane z:

- wymianą taboru na nowoczesne liniowe lokomotywy manewrowe, które charakteryzują się niskoemisyjnością,
- redukcją emisji spalin i gazów cieplarnianych z realizowanych procesów produkcyjnych,
- redukcją zapotrzebowania na energię w budynkach,
- niwelacją drgania i hałasu,
- segregacją odpadów, które oddawane są do recyklingu. [45]

W aspektach prawnych ważnym jest zbadanie możliwości zastosowania innowacyjnych podkładów kolejowych na liniach w Polsce.

Celem badań w obszarze aspektów prawnych jest zaproponowanie prawnej ścieżki postępowania w sytuacji chęci wykorzystania polimerowych podkładów kolejowych przez przedsiębiorstwo Infra Silesia.

W aspektach technologicznych ważnym jest zbadanie właściwości polimerowych podkładów kolejowych jak również zbadanie wpływu ekspozycji podkładów polimerowych na symulowane warunki atmosferyczne w komorze klimatycznej. Celem badań w aspektach technologicznych będzie rekomendacja jednego z dwóch rodzajów innowacyjnych polimerowych podkładów kolejowych.

Materiały polimerowe oraz kompozyty zyskują coraz większą popularność w wielu dziedzinach przemysłu, w tym również w przemyśle kolejowym np. przy produkcji podkładów kolejowych. Tradycyjne podkłady mają wiele wad, takich jak duża masa, niska wytrzymałość mechaniczna, niskie właściwości izolacyjne a także trudności w transporcie i montażu. Polimery mogą stanowić materiał alternatywny, ponieważ są lżejsze, bardziej elastyczne a ich własności mechaniczne oraz cena w stosunku do wyrobów klinkierowych stanowi zdecydowanie wartość do rozważenia innowację. Jednak, aby określić własności takich podkładów oraz ustosunkować się do wymagań rynku kolejowego konieczne jest przeprowadzenie szeregu kompleksowych badań materiałowych oraz sporządzić ich analizę, czego podjęto się w niniejszej pracy naukowej.

Interpretacja literatury dotyczącej badanego tematu pozwala stwierdzić, że materiały polimerowe mają wiele zalet w stosunku do tradycyjnych materiałów stosowanych w budownictwie kolejowym. Charakteryzują się mniejszą gęstością, co pozwala na zmniejszenie masy całej konstrukcji. Oprócz tego, posiadają one dużą odporność na warunki atmosferyczne i niekorzystne warunki środowiskowe, takie jak wilgoć, sole i kwasy, co wpływa na zwiększenie trwałości konstrukcji. Materiały polimerowe są także odporne na korozję i oddziaływanie mikroorganizmów, co jest szczególnie istotne w przypadku konstrukcji umieszczonych w gruncie. Zastosowanie ich do budowy podkładów kolejowych może pozwolić na zwiększenie wytrzymałości i stabilności torów, a także na zmniejszenie hałasu wywoływanego przez przejeżdżające pociągi.

Efektom tej pracy ma być odpowiedź na pytanie czy podkłady z tworzyw sztucznych mogą zastąpić te produkowane w sposób tradycyjny oraz poddać testom i porównać dwa rodzaje materiałów polimerowych – polietylen oraz poliuretan.

W głównej części – doświadczalnej, zostaną przedstawione metody badań laboratoryjnych które wykorzystaliśmy tj. test palności, temperatura ugięcia, wytrzymałość

na ściszenie i zginanie, analizy DMA i DSC a także eksploracja wpływu warunków klimatycznych na wybrane materiały. Opisane także zostaną normy europejskie użyte do prawidłowego przeprowadzenia badań, charakterystyka procesu i jego główne jego parametry.

W przebiegu doświadczeń oraz analizie badań zostaną przedstawione dokładne opisy badań przeprowadzonych na próbkach (poliuretanowej oraz polietylenowej) w laboratorium, oraz sporządzone zostaną ich wyniki, wraz z interpretacją i analizą. Zostaną omówione parametry badanych materiałów oraz porównane z danymi dotyczącymi tradycyjnych betonowych podkładów kolejowych. Część ta zawierać będzie również zbiór wykresów oraz tabeli na podstawie których sformułowane zostaną wnioski dotyczące przydatności badanych materiałów do zastąpienia tradycyjnych betonowych podkładów kolejowych.

Podsumowanie zawierać będzie najważniejsze wnioski a także określone zostaną możliwości dalszych badań nad materiałami polimerowymi. W tej części przedstawione będą także sugestie dotyczące zastosowań badanych materiałów polimerowych w produkcji podkładów kolejowych oraz wskazane zostaną ewentualne dalsze badania, które należałoby przeprowadzić.

Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy mają istotne znaczenie w kontekście poszukiwania nowych, bardziej wytrzymałych i trwałych materiałów stosowanych w infrastrukturze kolejowej. Praca ta może stanowić cenne źródło informacji dla naukowców, inżynierów i przedsiębiorców, którzy zajmują się rozwojem nowych technologii w tej dziedzinie.

## 2.2. Cel i teza pracy

**Celem pracy jest zbadanie możliwości zastosowania podkładów polimerowych w branży kolejowej w Polsce.**

Cel pracy został osiągnięty poprzez realizację następujących zadań:

- analizę literatury prawa pod kątem zastosowania podkładów kolejowych z materiałów polimerowych,
- analizę literatury prawa pod kątem wdrażania innowacji w branży kolejowej w Polsce,
- zbadanie dwóch wybranych podkładów polimerowych pod kątem wytrzymałości na zmienne warunki atmosferyczne,
- analizę pod kątem środowiskowym,
- analizę cyklu życia podkładów kolejowych produkowanych w sposób tradycyjny jak również polimerowych podkładów kolejowych.

W pracy przyjęto następującą tezę:

**Zasadnym jest stosowanie materiału polimerowego wykonanego z polietylenu do produkcji podkładów kolejowych z wykorzystaniem recyklingu, w odróżnieniu do materiału polimerowego wykonanego z poliuretanu.**

### **3. METODYKA BADAŃ**

#### **3.1. Cel badań**

Celem przeprowadzonych badań była analiza oraz odpowiedź na zadane pytania badawcze na temat wpływu czasu ekspozycji materiałów polimerowych PE i PU w komorze klimatycznej o zmiennych warunkach atmosferycznych.

#### **3.2. Badane materiały**

Badania przeprowadzono na podkładach kolejowych wykonanych z polietylenu oraz poliuretanu.

Do przeprowadzenia badania ściskania próbki PE pobierane były z różnych części przekroju poprzecznego podkładu kupionego u producenta, dodatkowo oznaczono je jako „R” – próbka pobrana w okolicy rdzenia podkładu oraz „B” – próbka brzegowa (Rys. 23.)

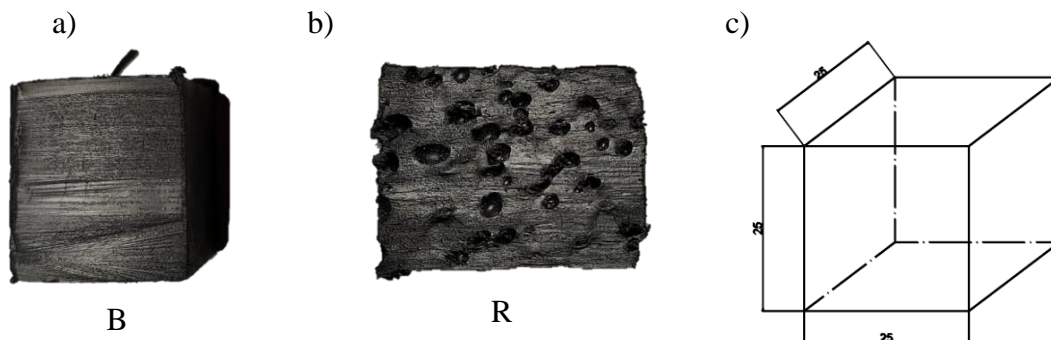


*Rysunek 24. Oznaczenia próbek z przekroju poprzecznego podkładu polietylenowego*

Próbki pobierane były w dwóch różnych miejscach, ponieważ przy zadanych parametrach odlewania rdzeń próbek był o znacznie wyższej porowatości, a co za tym idzie mniejszej gęstości, która ma przekład na wyniki badań (Rys. 24.).

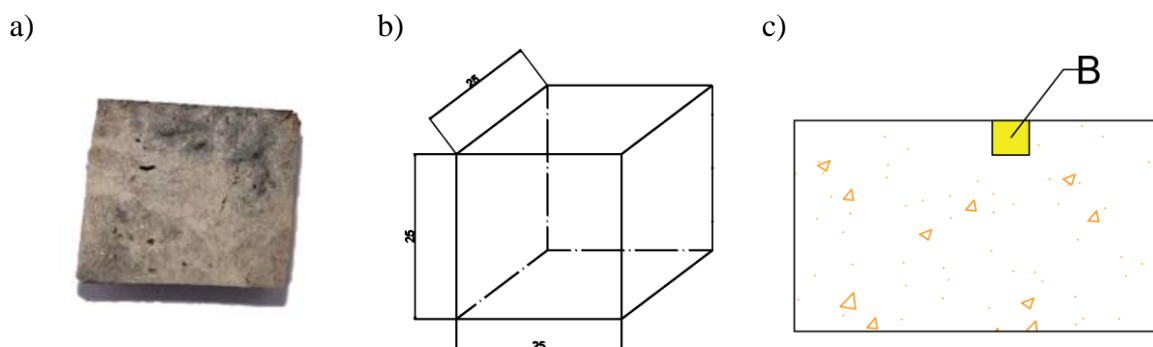


*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*



Rysunek 25. Zestawienie a) próbek z podkładu polietylenowego: brzegu oraz b) rdzenia do badania ściskania, a także c) schemat przedstawiający wymiary próbek

Próbki PU pobierane były również z przekroi poprzecznych podkładów kolejowych zakupionych u producenta. W tym przypadku każda próbka była próbką brzegową. W materiale poliuretanowym nie zaobserwowano znaczących różnic w porowatości materiału na jego przekroju.



Rysunek 26. Próbkę z a) podkładu poliuretanowego do badania ściskania, b) schemat przedstawiający wymiar próbek c) schematyczny rysunek przedstawiający miejsce pobrania próbek na przekroju poprzecznym podkładu

### 3.3. Parametry badane

Z uwagi na fakt umiejscowienia podkładu kolejowego w torze i sił działających podczas transportu kolejowego zdecydowano o zbadaniu takich parametrów jak:

- wytrzymałość na ściskanie (jak podkłady sprostają obciążeniu ściskającemu)
- wytrzymałość na zginanie
- temperaturę ugięcia pod obciążeniem HDT

Badano indeks tlenowy i jakość spalin pod kątem dbałości o środowisko w przypadku wydzielaniu się substancji podczas ewentualnego pożaru.

Próbki przetestowano pod kątem zmiennych warunków atmosferycznych w komorze klimatycznej. Zasyulowano warunki atmosferyczne panujące w Polsce- symulacja 10lat warunków atmosferycznych- co odwzorowuje praktyczne warunki zastosowania podkładów w tym okresie.

DSC i DMA- zmiany strukturalne, które mogą wystąpić w materiale polimerowym i mogą mieć wpływ na odporność na ściskanie.

Ponadto zbadano wpływ na ekonomie przedsiębiorstwa pod kątem porównania kosztów pomiędzy tradycyjnie kupowanymi podkładami betonowymi i drewnianymi a podkładami polimerowymi

## **4. OPIS PRZEPROWADZONYCH TESTÓW BADAWCZYCH**

### 4.1. Temperatura ugięcia pod obciążeniem HDT

#### **Opis teoretyczny**

Test temperatury ugięcia pod obciążeniem HDT to jedno z najczęściej stosowanych badań w dziedzinie materiałów polimerowych. Jest to ważny test pozwalający na określenie temperatury, w której dany materiał utraci swoją wytrzymałość mechaniczną pod wpływem stałego obciążenia. W testach tego typu wykorzystuje się normę PN-EN ISO 75, w której opisano ogólną metodę testowania temperatury ugięcia pod obciążeniem (naprężenia zginającego w zginaniu trójpunktowym) dla różnych typów tworzyw sztucznych.

Metoda ta pozwala na ocenę względnego zachowania różnych typów materiałów w podwyższonej temperaturze pod wpływem zadanego naprężenia zginającego, należy jednak pamiętać, że uzyskane wyniki nie zawsze wyznaczają maksymalną rzeczywistą temperaturę użytkowania, którą uzyskać można tylko dla materiałów o tym samym module zginania w temperaturze pokojowej. W praktyce warunki testowe mogą różnić się od rzeczywistych warunków użytkowania, np. warunkami obciążenia, czasem obciążenia czy nominalne naprężenia powierzchniowe

Próbka jest zwykle w kształcie beleczki o określonych wymiarach, a jej środek jest ustawiony na osi symetrii względem podpór na których jest ułożona. W trakcie testu próbka jest ogrzewana w sposób ciągły z określoną szybkością. Podczas ogrzewania, obciążenie przyłożone do próbki pozostaje stałe. Temperatura ugięcia pod obciążeniem HDT jest określona jako temperatura, w której próbka materiału polimerowego ulega odkształceniu równowagowemu przy zadanym naprężeniu zginającym 0,46 MPa, 1,80 MPa lub 8,00 MPa. Wartość ta jest wyznaczana na podstawie pomiaru odkształcenia próbki oraz temperatury, w której to odkształcenie jest osiągnięte. Procedura testu HDT wymaga przeprowadzenia co najmniej trzech niezależnych prób.

Wyniki testów HDT są istotne dla konstruktorów oraz producentów wyrobów z tworzyw sztucznych. Wiedza na temat temperatury ugięcia pod obciążeniem HDT pomaga w określeniu optymalnej temperatury obróbki oraz temperatury przechowywania i użytkowania wyrobu, co z kolei wpływa na jego trwałość i wytrzymałość. Mając powyższe na uwadze przedsiębiorstwo uznało za kluczowe sprawdzenie temperatury ugięcia pod obciążeniem HDT dla obu próbek podkładów kolejowych polimerowych (zarówno z polietylenu jak i poliuretanu) gdyż będzie to jedno z ważniejszych obciążeń występujących

na drogach kolejowych podczas transportu kolejowego. Testy te są również stosowane w badaniach mających na celu określenie wpływu dodatków do materiałów polimerowych na ich właściwości termiczne.

### **Parametry badania**

Temperatura ugięcia pod obciążeniem HDT została zbadana zgodnie z normą PN-EN ISO 75-2:2013 *Tworzywa sztuczne Oznaczanie temperatury ugięcia pod obciążeniem - Część 2: Tworzywa sztuczne i ebonit*, stosując następujące parametry badania:

- medium grzewcze: olej silikonowy;
- naprężenie zginające: 1,8 MPa;
- próbki do badań w postaci beleczek o wymiarach ok. 80 x 10 x 4 mm wycięto metodą obróbki skrawaniem (Rysunek 4);
- próbki badano w położeniu płaskim.



*Rysunek 27. Wymiary próbek używanych do badania temperatury ugięcia HDT*

### **Sprzęt laboratoryjny**

Sprzęt laboratoryjny użyty do badania temperatury ugięcia pod obciążeniem HDT to Instron HV3S zamieszczony na Rysunku nr 27.



*Rysunek 28. Maszyna do badań temp. ugięcia pod obciążeniem HDT Instron HV3S*

#### 4.2. Wytrzymałość na ściskanie

##### **Opis teoretyczny**

Badanie wytrzymałości na ściskanie jest jednym z podstawowych testów mechanicznych stosowanych do oceny właściwości materiałów polimerowych. Test ten pozwala na określenie siły potrzebnej do zniszczenia próbki poddanej jednostajnemu ściskaniu w kierunku osi prostopadłej do jej powierzchni.

##### **Parametry badania**

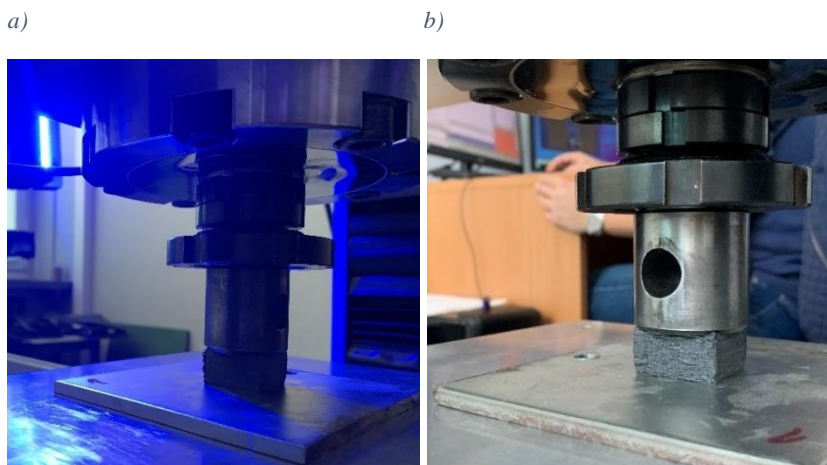
Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą europejską PN-EN ISO 604:2006 *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości przy ściskaniu*, stosując następujące parametry i warunki badania:

- przed przeprowadzeniem badania próbki badawcze kondycjonowano przez 24 godziny w temperaturze  $(22\pm 1)^{\circ}\text{C}$  i wilgotności względnej  $(50\pm 5)\%$ ;
- wymiary próbek: sześcienna kostka o boku 25 mm;
- temperatura badania:  $22^{\circ}\text{C}$ ;
- liczba próbek do badań: 5;
- prędkość badania: 1 mm/min.

##### **Sprzęt laboratoryjny**

Badanie przeprowadzono za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej LabTest 6.100 firmy LaborTech I klasy dokładności (Rysunek 28), ściskanie próbek prowadzono pomiędzy dwiema płytami stalowymi.

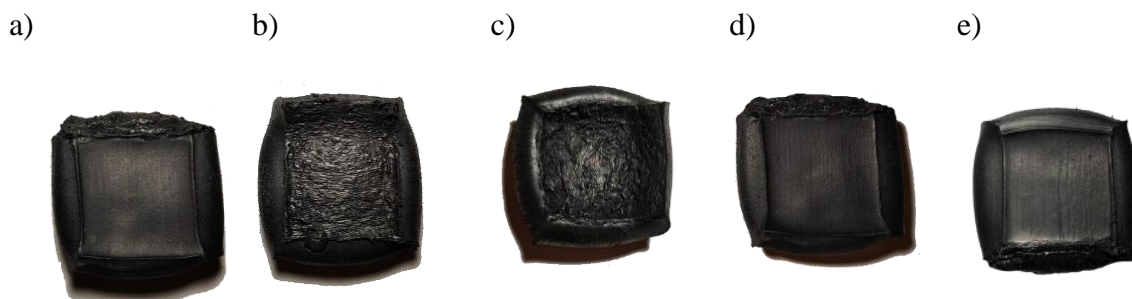
*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*



*Rysunek 29. Maszyna wytrzymałościowa LabTest 6.100 I klasy dokładności: a) widok ogólny, b) widok głowicy ściskającej*

### **Obserwacje**

Ściskane próbki pobrane z materiału polietylenowego (PE) przed ekspozycją w komorze klimatycznej zostały zamieszczone poniżej: Rysunek 29, Rysunek 30 i Rysunek 31. Próbki z materiałów polimerowych do badania ściskania zostały pobrane z brzegu podkładu polimerowego Rys. 29 oraz Rys. 30 oraz z rdzenia podkładu polimerowego Rys. 31.

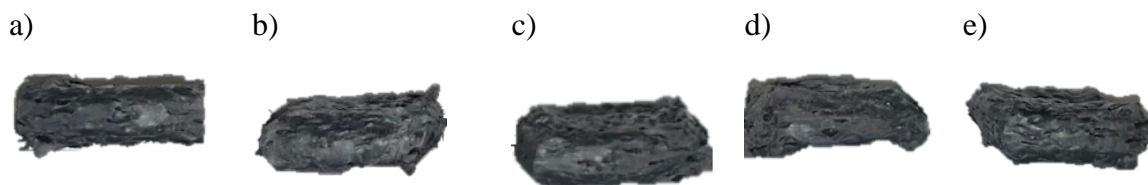


*Rysunek 30. Ściskane próbki polietylenowe brzegowe (PE B) przed komorą- ujęcie z lotu ptaka. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5*



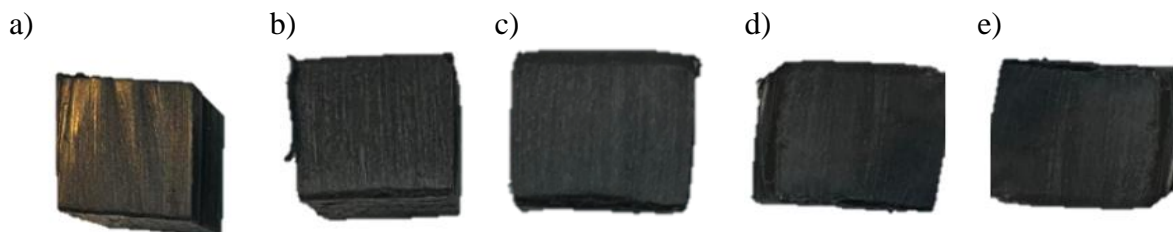
*Rysunek 31. Ściskane próbki polietylenowe brzegowe (PE B) przed komorą. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5*

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

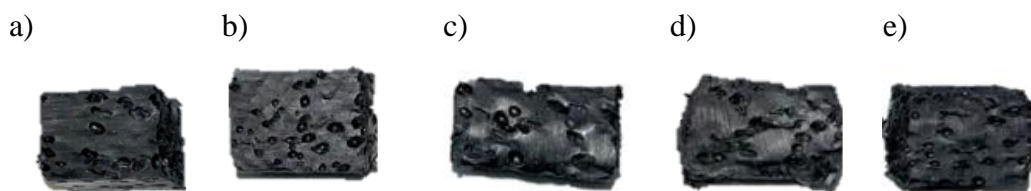


Rysunek 32. Ściskane próbki polietylenowe rdzenia (PE R) przed komorą. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5

Ściskane próbki pobrane z materiału polietylenowego (PE) po komorze klimatycznej zostały zamieszczone poniżej: Rysunek 32, Rysunek 33. Próbki z materiałów polimerowych do badania ściskania zostały pobrane z brzegu podkładu polimerowego Rys. 10 oraz z rdzenia podkładu polimerowego Rys. 33.



Rysunek 33. Ściskane próbki polietylenowe B po komorze klimatycznej. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5



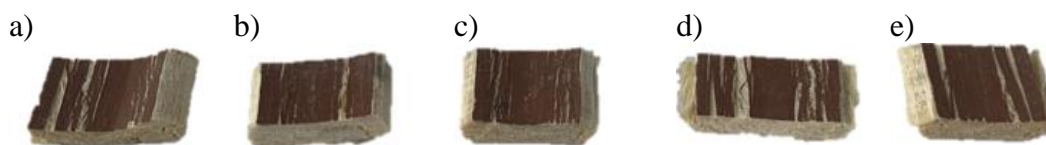
Rysunek 34. Ściskane próbki polietylenowe R po komorze klimatycznej. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5

Ściskane próbki pobrane z materiału poliuretanowego (PU) przed ekspozycją w komorze klimatycznej zostały zamieszczone poniżej: Rysunek 34.



*Rysunek 35. Ściskane próbki poliuretanowe przed komorą klimatyczną. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5*

Ściskane próbki pobrane z materiału poliuretanowego (PU) po ekspozycji w komorze klimatycznej zostały zamieszczone poniżej: Rysunek 35.



*Rysunek 36. Ściskane próbki poliuretanowe po komorze klimatycznej. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5*

W celu podkreślenia otrzymanych wyników z przeprowadzonego badania ściskania na próbkach polimerowych przed i po komorze klimatycznej uzyskano obrazy makrostruktur jaki i kształtu ogólnego przedstawionych na Rysunkach 36, 37 i 38.

Na Rysunku 36. przedstawiono próbki po badaniu wytrzymałości na ściskanie, pobrane z podkładu kolejowego wykonanego z polietylenu (z rdzenia). Po lewej stronie zdjęcia przedstawiono próbkę przed ekspozycją w komorze klimatycznej a po prawej stronie zdjęcia przedstawiono próbkę po ekspozycji w komorze klimatycznej.

Na Rysunku 37. przedstawiono próbki po badaniu wytrzymałości na ściskanie, pobrane z podkładu kolejowego wykonanego z polietylenu (z brzegu). Po lewej stronie zdjęcia widzimy próbkę przed ekspozycją w komorze klimatycznej a po prawej stronie zdjęcia widzimy próbkę po ekspozycji w komorze klimatycznej.

Na Rysunku 38. przedstawiono próbki po badaniu wytrzymałości na ściskanie, pobrane z podkładu kolejowego wykonanego z poliuretanu. Po lewej stronie zdjęcia widzimy próbkę przed ekspozycją w komorze klimatycznej a po prawej stronie zdjęcia widzimy próbkę po ekspozycji w komorze klimatycznej.



*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

a)

b)



*Rysunek 37. Porównanie próbek PE (rdzeń), a) przed komorą, b) po komorze*

a)

b)



*Rysunek 38. Porównanie próbek PE (brzeg), a) przed komorą, b) po komorze*

a)

b)



*Rysunek 39. Porównanie próbek PU, a) przed komorą, b) po komorze*

#### 4.3. Wytrzymałość na zginanie

##### **Opis teoretyczny**

Badanie to jest procesem oceny odporności materiałów na odkształcenia wzdłuż osi prostopadłej do ich kierunku. Podczas badania, próbka materiału jest ustawiana pomiędzy dwoma punktami podparcia, a następnie działają na nią siły zginające poprzez nacisk wgnębnika. Wynikające z tego naprężenia są mierzone i analizowane za pomocą maszyny wytrzymałościowej.

##### **Parametry badania**

Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą europejską PN-EN ISO 178:2019-06 *Tworzywa sztuczne– Oznaczanie właściwości przy zginaniu*, stosując następujące warunki i parametry badania:

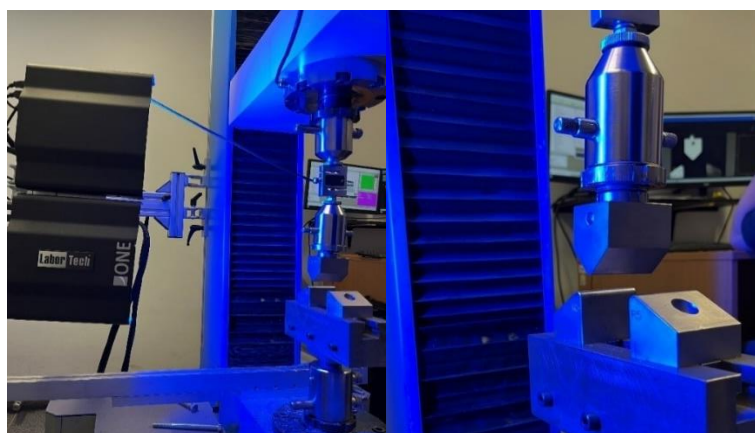
- temperatura badania: 22,3°C;
- zastosowano kształtki badawcze w postaci beleczek o wymiarach ok. 100 x 10 x 4 mm, które przygotowano metodą obróbki skrawaniem;
- liczba kształtek do badań: 5;
- rozstaw podpór: 64 mm;
- prędkość badawcza: 10 mm/min;
- odkształcenie próbki mierzono za pomocą ekstensometru optycznego.

##### **Sprzęt laboratoryjny**

Badanie przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej LabTest 6.100 firmy Labortech sprzężonej z ekstensometrem optycznym X-Sight ONE 2 (Rys. 39).

a)

b)



Rysunek 40. Maszyna wytrzymałościowa model LabTEST 6.100, a) po lewej widok z ekstensometrem, b) po prawej widok zgnębnika.

## **Obserwacje**

Podczas badania zginania próbki pobrane z podkładów kolejowych wykonanych z materiału polietylenowego ulegały równomiernemu zginaniu- można było zaobserwować stałe ugięcie próbki wraz ze zwiększaniem siły nacisku wgnętnika. Próbki zarówno przed komorą (Rys. 40) jak i po komorze (Rys. 41) po wykonanym teście zginania odkształciły się nieznacznie, lecz bez widocznej różnicy pomiędzy obiema próbkami.



*Rysunek 41. Zginane próbki PE przed komorą. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5*



*Rysunek 42. Zginane próbki PE po komorze. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5*

Podczas badania odporności na zginanie próbki pobrane z podkładów kolejowych wykonanych z materiału poliuretanowego wzmocnionego włóknami szklanymi wykazywały nierównomierny stopień odkształcenia, zaobserwowano różne odkształcenie próbek co wskazuje na różnice wytrzymałości na zginanie. Wgłębienia na próbkach będące pozostałością po wykonanym teście zginania po wgłębniku różniły się na próbkach- najprawdopodobniej znaczenie ma ilość włókien szklanych na  $\text{cm}^2$  w różnych próbkach (zastosowanych kształtkach badawczych). Próbki zarówno przed komorą (Rys. 42) jak i po komorze (Rys. 43) po wykonanym teście zginania odkształciły się w sposób znaczący- doszło do trwałego rozdzielenia faz pomiędzy włóknami szklanymi a poliuretanem, zaobserwowano pęknięcia wzdłużne, wzdłuż włókien szklanych na próbkach po komorze klimatycznej. Natomiast na próbkach przed komorą klimatyczną doszło do pęknięcia poprzecznego próbki w miejscu nacisku wgłębnika- czego nie zanotowano na próbkach po komorze klimatycznej. Próbka po komorze klimatycznej była bardziej sprężysta. Na rysunku 42. przedstawiono tylko 3 próbki gdyż 2 pozostałe zostały poddane spaleni w celu zbadania % ilości włókien szklanych.

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

a)



b)



c)



*Rysunek 43, Zginane próbki PU przed komorą. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3,*

a)



b)



c)



d)



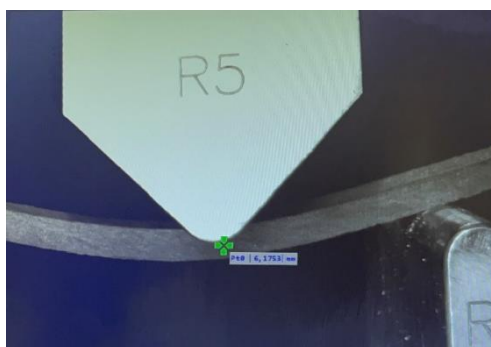
e)

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

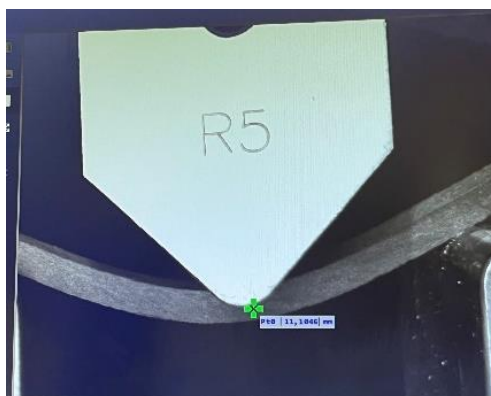


Rysunek 44. Zginane próbki PU po komorze. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5

Podczas przebiegu badań testów odporności na zginanie zaobserwowano, że próbki podkładu kolejowego wykonanego z polietylenu wygięły się sprężysto przy zadanej sile maksymalnej- bez trwałych odkształceń czy zmian w strukturze (Rys.44 i Rys. 45). Natomiast przebiegu badań testów odporności na zginanie zaobserwowano, że próbki podkładu kolejowego wykonanego z poliuretanu wzmacnianego włóknami szklanymi wygięły się niesprężysto przy zadanej sile maksymalnej- doszło do trwałych odkształceń (Rys.46 i Rys. 47). Wyżej opisane zachowanie materiału potwierdza przekroczenie granicy plastyczności co skutkuje trwałą odkształceniem, niekorzystnym z punktu widzenia długotrwałego użytkowania podkładów.



Rysunek 45. Próbką PE przed komorą podczas badania zginania

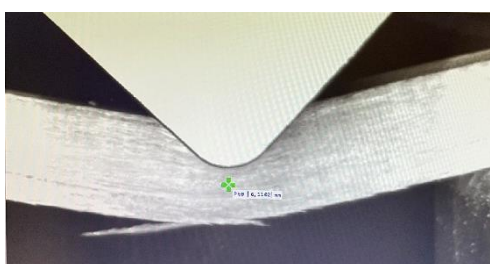


Rysunek 46. Próbką PE po komorze podczas badania zginania





*Rysunek 47. Próbką PU przed komorą podczas badania zginania*



*Rysunek 48. Próbką PU po komorze podczas badania zginania*

#### 4.4. Ekspozycja w komorze klimatycznej

##### **Opis teoretyczny**

Ekspozycja w komorze klimatycznej to proces, w którym materiały i produkty są poddawane kontrolowanym warunkom temperaturowym i wilgotnościowym, aby ocenić ich wytrzymałość i trwałość w różnych warunkach środowiskowych. Ta metoda testowania jest wykorzystywana w wielu branżach, takich jak motoryzacja, lotnictwo, elektronika, przemysł spożywczy czy farmaceutyczny. Badanie przeprowadza się przy użyciu urządzenia, które umożliwia symulowanie różnych warunków środowiskowych, takich jak ekstremalne temperatury, wilgotność, promieniowanie UV, zmiany ciśnienia itp. Dzięki temu możliwe jest przetestowanie produktów i materiałów pod kątem wpływu zastosowanych warunków ekspozycji (kontrolowanym warunkom temperaturowym i wilgotnościowym) w komorze klimatycznej na badane materiały. Wykonanie badań właściwości mechanicznych i analiza uzyskanych wyników badań dla produktów i materiałów niepoddanych ekspozycji oraz po ekspozycji w określonych warunkach w komorze klimatycznej pozwala ocenić ich wytrzymałość i trwałość w różnych warunkach środowiskowych.

Komora klimatyczna to urządzenie, które umożliwia symulowanie różnych warunków środowiskowych, takich jak ekstremalne temperatury, wilgotność, promieniowanie UV, zmiany ciśnienia itp. które mogą być stosowane odrębnie bądź jednocześnie, oraz które mogą ulegać zmianie, w zakresie technicznym możliwym do osiągnięcia przez stosowaną do ekspozycji komorę, zgodnie z ustalonymi warunkami cykli ekspozycji, Dzięki temu możliwe jest przetestowanie produktów i materiałów pod kątem ich odporności na warunki, które mogą wystąpić w trakcie użytkowania lub przechowywania.

W czasie ekspozycji w komorze klimatycznej materiał lub produkt jest umieszczany w odpowiedniej komorze, gdzie panują zadane warunki środowiskowe. Proces ten może trwać od kilku godzin do kilku tygodni, w zależności od wymaganej długości testu.

Podczas ekspozycji w komorze klimatycznej przeprowadzane są różne testy, takie jak:

- Test odporności na zmiany temperatury - w trakcie tego testu temperatura w komorze jest zmieniana w określonych przedziałach czasowych, aby sprawdzić, jak materiał lub produkt zachowuje się w warunkach zmian temperatury.
- Test odporności na wilgotność - w trakcie tego testu wilgotność w komorze jest kontrolowana, aby sprawdzić, jak materiał lub produkt zachowuje się w wilgotnym środowisku.
- Test odporności na zmiany ciśnienia - w trakcie tego testu produkt jest umieszczany w komorze, w której ciśnienie jest kontrolowane, aby sprawdzić, jak zachowuje się w warunkach zmian ciśnienia.
- Test odporności na korozję - w trakcie tego testu produkt jest umieszczany w agresywnym środowisku chemicznym, aby sprawdzić, jak szybko traci swoje właściwości fizyczne i chemiczne.

Wszystkie ww. testy umożliwiają ocenę wytrzymałości i plastyczności materiałów i produktów w różnych warunkach środowiskowych. Dzięki temu możliwe jest określenie, jak długo produkt będzie działał w warunkach, w których będzie używany, oraz jakie czynniki mogą wpłynąć na jego żywotność, odporności na warunki, które mogą wystąpić w trakcie użytkowania lub przechowywania. Z uwagi na fakt, iż na liniach kolejowych występują zmienne warunki atmosferyczne spowodowane zarówno zmianami temperatury w trakcie roku jak i zmianami wilgotności podjęto z Przedsiębiorstwem decyzje o konieczności zbadania wpływu zmiennych warunków atmosferycznych na oba rodzaje polimerowych podkładów kolejowych.



## **Parametry badania**

Ekspozycja w komorze klimatycznej prowadzona była stosując następujące warunki i parametry pomiaru:

- cykl:
  - przejście do temp. +80°C/RH 90% w czasie 1h;
  - ekspozycja w temp. +80°C/RH 90% przez 3h;
  - przejście do temp. -40°C w czasie 1h;
  - ekspozycja w temp. -40°C przez 3h;
- liczba wykonanych cykli: 50.

Założone parametry powinny odwzorować 10 lat przebywania podkładu kolejowego w naturalnych warunkach atmosferycznych (wynika to z zakładach ilości pełnych przemarzań). Badanie trwało 400 godzin.

## **Sprzęt laboratoryjny**

Ekspozycję prowadzono w komorze klimatycznej ATT Discovery CS640 (Rys. 48).



*Rysunek 49. Komora klimatyczna ATT Discovery CS640*

### **4.5. Różnicowa kalorymetria skaningowa (DSC)**

#### **Opis teoretyczny**

Badanie to jest techniką termoanalityczną, która opisuje zmiany własności cieplnych molekuł danego materiału przy kontrolowanym stopniowym jego ogrzewaniu lub chłodzeniu. Sam pomiar polega na porównaniu cieków referencyjnej oraz ogrzewanej / chłodzonej, których wartość wyjściowa temperatury jest taka sama. Jeśli w próbce zachodzić

będą procesy egzotermiczne oznacza to, że prędkość przepływu ciepła materiału badanego jest mniejsza niż próbki referencyjnej, natomiast w przypadku reakcji endotermicznych większa. Klasyczna metoda opiera się na wyrównywaniu poziomu temperatur pomiędzy próbkami referencyjną i badaną, natomiast wynikiem badania jest termogram z tzw. krzywa DSC, która stanowi zależność pomiędzy różnicą strumieni cieplnych od temperatury.

### **Parametry badania**

Wykonano analizę DSC w celu oznaczenia temperatury oraz entalpii topnienia krystalizacji. Analizę DSC przeprowadzono zgodnie z *PN-EN ISO 11357-1:2016-11 Tworzywa sztuczne – Różnicowa kalorymetria skaningowa (DSC) – Część 1: Zasady ogólne* oraz *PN-EN ISO 11357-3:2018-06 Tworzywa sztuczne – Różnicowa kalorymetria skaningowa (DSC) – Część 3: Oznaczanie temperatury oraz entalpii topnienia i krystalizacji* przy użyciu różnicowego kalorymetru skaningowego DSC 822e firmy Mettler Toledo.

Warunki badania:

- zakres temperatury badania:  $-50^{\circ}\text{C}$ ÷ $220^{\circ}\text{C}$ ;
- szybkość grzania i chłodzenia:  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ;
- czas trwania segmentów izotermicznych: 5 minut;
- zastosowany gaz płuczający i jego czystość i przepływ:  $\text{N}_2$ , 99,9992 %, 60 ml/min;
- zastosowany tygiel: Al 40 $\mu\text{l}$  z perforowaną pokrywką;
- masa próbki do badań: 6,77-10,02 mg

### **Sprzęt laboratoryjny**

Oznaczanie temperatury topnienia i krystalizacji wykonano przy użyciu różnicowego kalorymetru skaningowego DSC 822e firmy Mettler Toledo (Rys. 49).



*Rysunek 50. Różnicowy kalorymetr skaningowy DSC 882e*

## **Obserwacje**

Proces przygotowania próbki:

Na Rysunku 50. obserwujemy 2 miejsca na próbki badawcze- jedna będzie pusta a druga będzie wypełniona materiałem badanym. Kolejno należy przygotować okrągłą próbkę o średnicy ok 5mm (Rys 51 i Rys. 52). Kolejno badany materiał umieszczamy pojemniku badawczym którym jest tygielek wykonany z aluminium, który szczelnie zamykamy dedykowaną aluminiową pokrywką (Rys 53). Na Rys 54. przedstawione są już dwa pojemniki badawcze w odpowiednim miejscu tj. na płycie sensora pomiarowego w maszynie badawczej (różnicowym kalorymetrze skaningowym)- jeden pojemnik z badanym materiałem, drugi pusty w celach porównawczych.

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*



*Rysunek 51. Miejsce na próbki badawcze w różnicowym kalorymetrze skaningowym*



*Rysunek 52. Pojemniczek na próbkę badawczą*



*Rysunek 53. Spreparowana próbka badawcza*



*Rysunek 54. Proces szczelnego zamknięcia spreparowanej próbki badawczej w pojemniku badawczym*



*Rysunek 55. Umiejscowione dwa pojemniki badawcze- jeden z próbką badawczą a drugi wzorcowy- pusty*

#### 4.6. Dynamiczna analiza mechaniczna (DMA)

##### **Opis teoretyczny**

DMA to ważna technika umożliwiająca pomiar właściwości mechanicznych i lepkosprężystych takich materiałów, jak termoplasty, tworzywa termoutwardzalne, elastomery, ceramika czy metale. W analizatorach DMA próbka materiału jest deformowana na różne sposoby (wyginanie, rozciąganie, ścinanie i ściskanie) w celu poddania jej okresowym naprężeniom.

Mierzony jest moduł będący funkcją czasu lub temperatury, co dostarcza informacji na temat przejść fazowych.

Technologia DMA daje znakomite wyniki tam, gdzie wymagana jest najwyższa dokładność, a materiał musi być opisany w szerokim zakresie sztywności i/lub częstotliwości. Technologia DMA jest także niezwykle wszechstronna i pozwala nawet na tworzenie charakterystyk materiałów w cieczach oraz przy określonym poziomie wilgotności względnej.

##### **Parametry badania**

Dla próbek odniesienia oraz próbek po ekspozycji w komorze klimatycznej wykonano dynamiczną analizę mechaniczną (DMA) w celu określenia właściwości lepkosprężystych przy użyciu aparatu DMA/SDTA 861e firmy Mettler Toledo. Analizę przeprowadzono stosując zalecenia PN-EN ISO 6721-1:2011 *Tworzywa sztuczne -- Oznaczanie dynamicznych właściwości mechanicznych -- Część 1: Zasady ogólne*. Warunki i parametry badania:

- zakres temperatury badania: dla PE  $-170^{\circ}\text{C} \div 100^{\circ}\text{C}$ , dla PU  $-150^{\circ}\text{C} \div 230^{\circ}\text{C}$ ;
- szybkość grzania:  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ;
- częstotliwość: 1 Hz;
- amplituda przemieszczenia: 1  $\mu\text{m}$ ;
- amplituda siły: 14 N;
- tryb odkształceń: ścinanie.

### **Sprzęt laboratoryjny**

Analizę przeprowadzono przy użyciu DMA 861e firmy Mettler-Toledo (Rys. 55).

a)



b)



*Rysunek 56. Sprzęt DMA 861e firmy Mettler-Toled, a) po lewe całe urządzenie, b) po prawej przybliżenie na miejsce usytuowania próbki*

#### **4.7. Test palności**

##### **Opis teoretyczny**

Test palności to jedno z najważniejszych badań wykonywanych w laboratoriach materiałoznawczych. Testowanie palności obejmuje kilka metod badań mających na celu pomiar wrażliwości materiału, w tym jego:

- podatność na zapłon – cecha materiału mówiąca o jego zdolności do zapłonu pod wpływem źródła ciepła, iskry, czy innych czynników;
- szybkość spalania – parametr określający jak szybko reakcja spalania danego materiału przebiega, wyrażany zwykle w centymetrach na sekundę;
- rozprzestrzenianie się ognia -proces, w którym płomień lub gorące gazy przemieszczają się po powierzchni lub przez przestrzeń, zwykle zwiększając temperaturę otoczenia i przyspieszając spalanie;
- palność – ogólna zdolność materiału do utrzymania spalania w obecności źródła ciepła lub ognia;
- punkt – zapłonu najniższa temperatura, przy której materiał zaczyna się samorzutnie palić w obecności źródła ciepła lub iskry.



W niniejszej pracy za pomocą tego badania określono przydatność podkładów polimerowych do budowy linii kolejowych z uwzględnieniem ich znaczenia dla bezpieczeństwa w przypadku pożaru lub długotrwałego palenia z uwzględnieniem emisji gazów szkodliwych dla otoczenia.

### **Parametry badania**

Badanie intensywności wydzielania ciepła, dymu i masowej szybkości spalania wykonano zgodnie z normą ISO 5660-1:2015 *Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate — Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)* „Badanie reakcji na ogień. Intensywność wydzielania ciepła, emisja dymu i szybkość ubytku masy.” **Część 1:** „Badanie intensywności wydzielania ciepła”.

Do testu spreparowano próbki o wymiarach 100 x 100 x 4 mm. (Rys. 57 i Rys. 59).

### **Sprzęt laboratoryjny**

Analizę gazów przeprowadzono za pomocą spektrofotometru FTIR Thermo Scientific Antaris IGS (Rys. 56) podczas spalania badanych próbek w temperaturze 745°C na kalorymetrze stożkowym (Cone Calorimeter) firmy Fire Testing Technology.

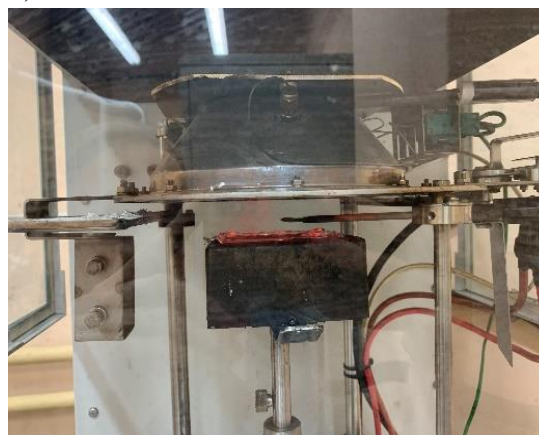
W badaniach zastosowane zostały próbki, które w stosunku do radiatora stożkowego zorientowane były poziomo, po czym zabezpieczając miejsce badania zapoczątkowano reakcję spalania przy użyciu zapalnika iskrowego.

Spektrometr FTIR gazów powstałych w trakcie testów spalania w kalorymetrze stożkowym umożliwia analizę ilościową wielu składników mieszaniny gazowej jednocześnie, takich jak wymienionych w Tabelach 20 i 22.

a)



b)



Rysunek 57. Kalorymetr stożkowy firmy Fire Testing Technology., a) urządzenie bez próbki, b) urządzenie z próbką

## **Obserwacje**

Próbka pobrana z podkładu polietylenowego spalała się równomiernie, czysto, bez wydzielania niebezpiecznych gazów, mała ilość popiołu (Rys. 58).



*Rysunek 58. Próbką podkładu polietylenowego przygotowana do badania palności*



*Rysunek 59. Próbką podkładu polietylenowego podczas badania palności*

Próbka pobrana z podkładu poliuretanowego spalała się nierównomiernie, mocny i drażniący zapach, badanie wykonywane było przy użyciu specjalistycznych masek, gdyż podczas spalania wydzielały się rakotwórcze gazy (Rys. 60). Na próbkach po badaniu palności stwierdzono widoczność włókien szklanych.



*Rysunek 60. Próbką podkładu poliuretanowego przygotowana do badania palności*



*Rysunek 61. Próbką podkładu poliuretanowego podczas badania palności*

Dodatkowo poddano spalaniu dwie próbki, które wcześniej były próbkami poddanymi badaniu wytrzymałości na zginanie i nie były eksponowane w komorze klimatycznej. W owych próbkach zanotowano różne nasycenie włóknami poliuretanowymi. Po spaleniu próbki nr 1 (Rys. 74. to próbka zaznaczona kolorem zielonym) zanotowano w niej 37% popiołu będącego włóknami szklanymi natomiast w próbce nr 2 (próbka zaznaczona kolorem różowym na Rys. 74.) zanotowano 50% nasycenie włóknami szklanymi.



#### 4.8. Analiza LCC dla Przedsiębiorstwa DB Cargo Polska

W ramach analizy LCC podkładów kolejowych wykonanych z 4 różnych materiałów (drewniane, betonowe, poliuretanowe i polietylenowe) dla przedsiębiorstwa w ramach niniejszej pracy pozyskano dane wsadowe potrzebne do przeprowadzenia kalkulacji.

Przy zróżnicowanym okresie deklarowanej użyteczności podkładów poszczególnych rodzajów, dochodzącym do 100% różnicy w czasookresach (25 lat vs 50), pierwszym okresem, który zawiera w sobie całkowite krotności wymian, jest 150 lat. Przy tak długim okresie koszt pozyskania kapitału zmierza do 0%, więc analiza zdyskontowanych przepływów pieniężnych nie pokaże istotnych różnic pomiędzy zastosowanymi technologiami. Z kolei przyjmując okres np. 12 lat (maksymalny dostępny czas obligacji skarbowych, jako ekwiwalentny koszt kapitału), nie będziemy w stanie uwzględnić długowieczności podkładów z tworzyw sztucznych, która jest ich atutem. Przyjęto na potrzeby pracy okres analizy = 150 lat. Tabela 10. przedstawia rodzaje podkładów, ilość sztuk wykorzystanych podkładów na 1 km długości torów, częstotliwość wymiany, zakładaną ilość wymian w ciągu 150 lat. Na Rysunku 61. zobrazowano czasookresy wymian poszczególnych typów podkładów kolejowych na przestrzeni 150 lat.

Rozstaw podkładów zależy od wymaganych parametrów eksploatacyjnych (nacisków osiowych, natężenia przewozów i maksymalnej szybkości pociągów) i w PKP waha się w granicach 0,60–0,80 m, jeśli pomiaru dokonuje się między osiami podkładów. Liczba podkładów na 1 km toru jest funkcją rozstawu podkładów oraz konstrukcji toru kolejowego i w warunkach polskich wynosi od 1233 do 1720 sztuk (w zależności od konstrukcji toru i jego klasy technicznej). W niniejszej pracy przyjęto średnią = 1500 podkładów na 1km toru [4]. Przeprowadzono analizę ekonomiczną kosztów i opłacalności montażu 4 różnych rodzajów podkładów. Analiza została przeprowadzona w dwóch ujęciach:

- Wariant I: ponoszone wydatki stanowią jednorazowy koszt w momencie ich realizacji
- Wariant II: koszty rozliczane amortyzacją ustaloną na poziomie rocznym w wysokości 4%



*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

ilości wymian danych podkładów w ciągu 150 lat. Całość przedstawiono w Tabeli 6. oraz w Tabeli 7. Dzieląc koszty na koszty pierwszego montażu i koszty kolejnych wymian.

Obliczenia wg wariantu I:

*Tabela 6. Zestawienie kosztów montażu*

<b>MONTAŻ</b>					
Rodzaj podkładu	Cena za zakup pierwszego podkładu (za sztukę)	Koszt pierwszego zakupu podkładów na 1km toru	Koszt montażu za 1 sztukę	Koszt montażu na 1km toru	Suma kosztów montażu (materiał + usługa)
Drewno	436 zł	654 000 zł	170 zł	255 000 zł	909 000 zł
Beton	330 zł	495 000 zł	170 zł	255 000 zł	750 000 zł
Poliuretan	1 660,75 zł	2 491 125 zł	170 zł	255 000 zł	2 746 125 zł
Polietylen	951,41 zł	1 427 115 zł	170 zł	255 000 zł	1 682 115 zł

*Tabela 7. Koszty wymian produktu w analizie 150letniej dla 1km toru*

<b>WYMIANA</b>							
Rodzaj podkładu	Cena za zakup kolejnych podkładów (za sztukę)	Koszt za zakup kolejnych podkładów (na 1km toru)	Koszt poniesiony na wymianę podkładu (za 1 sztukę)	Koszt poniesiony na wymianę podkładów (na 1km toru)	Suma kosztów poniesionych na zakup wymienianych podkładów w analizie	Suma kosztów poniesionych na wymianę podkładów w analizie	Suma kosztów wymian (materiał + usługa)
Drewno	436 zł	654 000 zł	170 zł	255 000 zł	3 270 000 zł	1 275 000 zł	<b>4 545 000 zł</b>
Beton	330 zł	495 000 zł	170 zł	255 000 zł	1 980 000 zł	1 020 000 zł	<b>3 000 000 zł</b>
Poliuretan	1 660,75 zł	2 491 125 zł	170 zł	255 000 zł	4 982 250 zł	510 000 zł	<b>5 492 250 zł</b>
Polietylen	475,71 zł	713 558 zł	170 zł	255 000 zł	1 427 115 zł	510 000 zł	<b>1 937 115 zł</b>

Kolejno praca badawcza nad pozyskaniem kosztów oraz przeanalizowanie kosztów utylizacji za sztukę podkładu kolejowego jak również przeliczenie kosztów na 1km toru. Dane posłużyły do obliczenia kosztów utylizacji w ciągu 150 lat. Zebrane dane jak i obliczenia przedstawiono w Tabeli 8.

*Tabela 8. Zestawienie kosztów utylizacji dla 4 rodzajów podkładów kolejowych na 150 lat dla 1km toru*

<b>UTYLIZACJA</b>				
Rodzaj podkładu	Ilość utylizacji w czasie analizy	Koszt utylizacji za sztukę	Koszt utylizacji podkładów (na 1km)	Koszt utylizacji w ciągu 150 lat
Drewno	5	80 zł	120 000 zł	<b>600 000 zł</b>
Beton	4	40 zł	60 000 zł	<b>240 000 zł</b>
Poliuretan	2	300 zł	450 000 zł	<b>900 000 zł</b>
Polietylen	0	0 zł	0 zł	<b>0 zł</b>

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowoopracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

Wszystkie zebrane dane pozwoliły obliczyć koszt życia produktu w złotych dla 4 analizowanych podkładów kolejowych na odcinku 1 km toru na 150lat.

Zgodnie z przeanalizowaną literaturą przedmiotu LCC zostało obliczone metodą prostą wg poniższego wzoru a wyniki zostały zaprezentowane w Tabeli 9.

Równanie dla metody prostej

$$LCC = \text{Koszt nabycia} + \text{Koszt posiadania} + \text{Koszt likwidacji}$$

*Tabela 9. Zestawienie LCC dla 4 rodzajów podkładów kolejowych na 150lat dla 1km toru*

<b>Koszt życia produktu w zł</b>	
Drewno	<b>6 054 000 zł</b>
Beton	<b>3 990 000 zł</b>
Poliuretan	<b>9 138 375 zł</b>
Polietylen	<b>3 619 230 zł</b>

Analizując powyższe dane z Tabeli 9. stwierdzono duże różnice w koszcie początkowym, czyli zakupu podkładów kolejowych. Te różnice wpływają znacząco na LCC podkładów. Koszty zakupu rozkładały się następująco: podkład drewniany 436,00 zł, podkład betonowy 330,00 zł, podkład poliuretanowy 1660,75zł, podkład polietylenowy 951,41 zł.

Jeżeli cena podkładu betonowego = 100%, to podkład drewniany będzie równy 132% podkładu betonowego, podkład poliuretanowy = 503% a podkład polietylenowy= 288%.

Dodatkowo obliczono LCC dla wszystkich typów analizowanych podkładów na 1km toru na 150 lat.

LCC podkładów drewnianych = 6,1 mln zł

LCC podkładów betonowych= 4,0 mln zł

LCC podkładów poliuretanowych= 9,2 mln zł

LCC podkładów polietylenowych= 3,6 mln zł

Jeżeli przyjmiemy, że LCC podkładów polietylenowych = 100% to kolejno:

LCC podkładów drewnianych = 169%

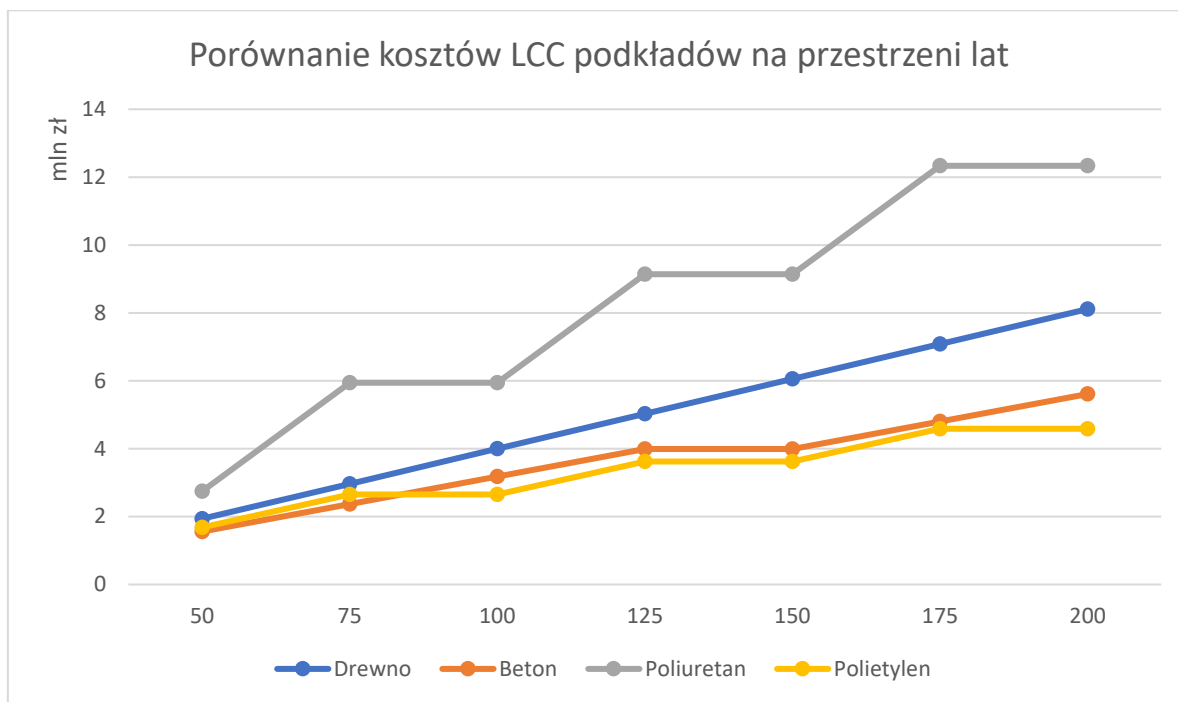
LCC podkładów betonowych= 111%

LCC podkładów poliuretanowych= 255%.

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

Tabela 10. Przedstawienie LCC różnych podkładów na 1km toru w czasookresach od 50-200 lat

	50	75	100	125	150	175	200
<b>Drewno</b>	1,94	2,97	4,00	5,03	6,05	7,08	8,11
<b>Beton</b>	1,56	2,37	3,18	3,99	3,99	4,80	5,61
<b>Poliuretan</b>	2,75	5,94	5,94	9,14	9,14	12,33	12,33
<b>Polietylen</b>	1,68	2,65	2,65	3,62	3,62	4,59	4,59



Rysunek 63. Wykres zmiany kosztów LCC dla 1km toru na przestrzeni lat dla 4 różnych typów podkładów kolejowych

**Obliczenia wg wariantu II:**

Jeżeli analizowalibyśmy koszty cyklu życia, w którym koszt zakupu podkładów będzie prezentowany pod postacią amortyzacji to sytuacja będzie wyglądać delikatnie inaczej- nie mniej jednak na korzyść podkładów wykonanych z polietylenu.

Obliczenia dotyczą wyłącznie oszczędności z zastosowania poszczególnych rodzajów podkładów – każdy rozpatrywany jest wyłącznie od strony kosztów / nakładów – bez generowania strumienia przychodów, stąd otrzymane skumulowane przepływy pieniężne i skumulowane zdyskontowane przepływy pieniężne na wykresach poniżej będą wyłącznie ujemne.

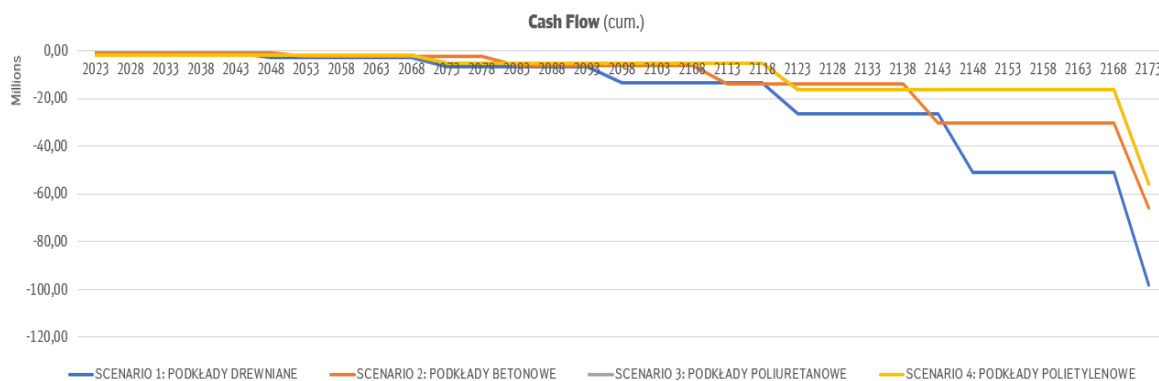
*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

Analiza długoterminowa (z wyłączeniem zdyskontowanych przepływów pieniężnych - > 1.) pokazuje, że w okresie 150 lat pozycja konkurencyjna podkładów polietylenowych kształtuje się następująco:

- a) przez pierwsze 25 lat po zastosowaniu – pozycja 3 z 4,
- b) następne 5 lat – pozycja 2 z 4,
- c) kolejne 20 lat – pozycja 1 z 4,
- d) kolejne 10 lat – pozycja 2 z 4,
- e) następne 40 lat – pozycja 1 z 4,
- f) i ostatnie 20 lat – pozycja 2 z 4,
- g) dopiero po 120 latach polietylen obejmuje 1. Pozycje.

Finalnie skumulowane przepływy pieniężne mają najniższą wartość dla podkładów polietylenowych, jednakże trwała dominacja nad podkładami betonowymi (zastosowanie, których daje drugi najniższy ujemny skumulowany przepływ pieniężny) następuje na 30 lat przed końcem okresu 150 letniego.

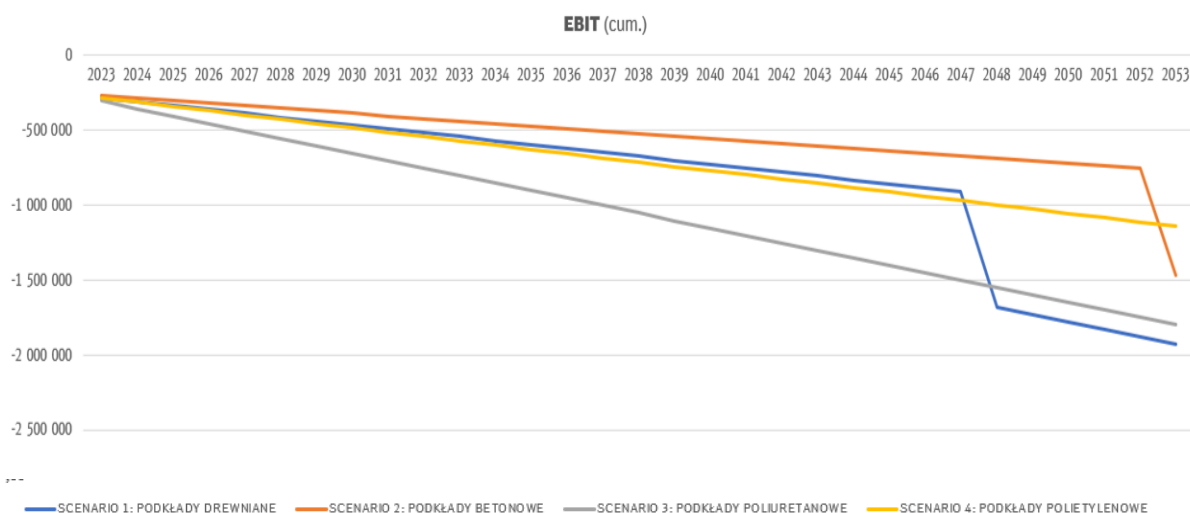
Te punkty zmieniające pozycję są uzależnione od kalendarza wymian poszczególnych rodzajów podkładów.



Rysunek 64. Skumulowane przepływy pieniężne obrazujące koszty cyklu życia 4 produktów w ujęciu 150letnim

Pomocniczo można też przeanalizować pierwsze 30 lat pod kątem skumulowanego wyniku ekonomicznego (EBIT), w którym koszt zakupu podkładów będzie prezentowany pod postacią amortyzacji. W takim ujęciu również wygrywają podkłady polietylenowe, dając najniższy ujemny wynik przedstawiony na Rysunku 63.

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*



Rysunek 65. Koszty cyklu życia 4 analizowanych produktów w ujęciu 30letnim

Jeżeli zatem w takim samym lub krótszym okresie analizowalibyśmy korzyści dla inwestora, który zdecydowałby się na zastosowanie podkładów polietylenowych, musiałyby to być oparte na okresie możliwości uzyskania dofinansowania części kosztów.

Innym motywatorem może być zmiana obowiązujących przepisów w takim kształcie, w którym oprócz zachęt do stosowania podkładów polietylenowych, pojawiłyby się naciski i ograniczenia w stosowaniu innych rodzajów podkładów (np. „kalendarz odchodzenia od podkładów drewnianych czy mineralnych).

Firma Infra Silesia S.A. będąca Zarządcą Infrastruktury Kolejowej prowadzi politykę proekologiczną i innowacyjną. Jest Przedsiębiorstwem otwartym na nowe technologie-chętnie wdraża nowe rozwiązania na rynku polskim- jednym z takich przypadków było wdrożenie bezpodsydkowych przejazdów kolejowych opartych na płytach nośnych systemu GTP firmy BFT International. Torowe płyty nośne systemu GTP to nowoczesny system nawierzchni przejazdów kolejowych, wykonanych z prefabrykowanych płyt GTP, stanowiących bezpodsydkową zintegrowaną nawierzchnię szynowo-drogową. Infra Silesia była prekursorem na rynku polskim w procesie dopuszczenia do eksploatacji.

Biorąc pod uwagę powyższe aspekty a przede wszystkim innowacyjne nastawienie firmy Infra Silesia S.A. i jej zarządzających firma poprosiła o analizę wymiany nawierzchni toru dojazdowego ze stacji Rybnik Towarowy, do bocznicy Rybnik Kłokocin, gdzie firma DB Cargo Polska realizuje utrzymanie taboru kolejowego. Jak również rozważyła wymianę

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

nawierzchni 2 torów wchodzących w skład bocznicy Rybnik Kłokocin z tradycyjnych podkładów kolejowych na polimerowe. Obliczenia wykonano Wariantem I.

Przeprowadzono analizę wymiany 2 odcinków torów na podkłady polietylenowe:

1. Przeanalizowano wymianę podkładów kolejowych na linii 211 i 211d, które usytuowane są pomiędzy stacjami Rybnik Towarowy i bocznica Rybnik Kłokocin. Długość odcinka przeznaczonego do wymiany: 7,556 km.
2. Dodatkowo Infra Silesia zaproponowała wymianę podkładów na odcinkach przedstawionych w Tabeli 11. Suma długości torów na bocznicy Kłokocin przeznaczonych pod wymianę podkładów to ok. 1 km.

*Tabela 11. Spis torów bocznicy Kłokocin przeznaczonych pod wymianę podkładów*

Nr torów	Długość w km
214	0,262
215	0,352
223	0,133
224	0,131
225	0,131

Analiza odcinka Rybnik Towarowy- Bocznica Kłokocin

W Tabeli 12. przedstawiono zestawienie kosztów wymiany podkładów na odcinku Rybnik Towarowy- Bocznica Rybnik Kłokocin:

*Tabela 12. Koszty wymiany podkładów na odcinku Rybnik Towarowy- Bocznica Kłokocin*

<b>MONTAŻ</b>					
Rodzaj podkładu	Cena za zakup pierwszego podkładu (za sztukę)	Koszt pierwszego zakupu podkładów na 1km toru	Koszt montażu za 1 sztukę	Koszt montażu na 1km toru	Suma kosztów montażu (materiał + usługa)
<b>Drewno</b>	436 zł	654 000 zł	170 zł	255 000 zł	6 868 404 zł
<b>Beton</b>	330 zł	495 000 zł	170 zł	255 000 zł	5 667 000 zł
<b>Poliuretan</b>	1 660,75 zł	2 491 125 zł	170 zł	255 000 zł	20 749 721 zł
<b>Polietylen</b>	951,41 zł	1 427 115 zł	170 zł	255 000 zł	12 710 061 zł

Koszty LCC odcinka Rybnik Towarowy- Bocznica Kłokocin na 150 lat zostały przedstawiono w Tabeli 13. Analizując wielkości w tabeli zauważamy zasadność ekonomiczną zastosowania podkładów polietylenowych. Jednakże analiza 150lat nie jest



*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

miarodajnym czynnikiem do podejmowania decyzji biznesowych- przedsiębiorstwa analizują inwestycje w czasie dużo krótszym- zważywszy na fakt, że tor kolejowy to budowla zatem przedsiębiorstwo widzi możliwość analizowania inwestycji w okresie 35 letnim (Tabela 14).

*Tabela 13. Koszty cyklu życia podkładów na 150 lat na odcinku Rybnik Towarowy- Bocznicia Kłokocin*

<b>Koszt życia produktu w zł</b>	
Drewno	<b>45 744 024 zł</b>
Beton	<b>30 148 440 zł</b>
Poliuretan	<b>69 049 562 zł</b>
Polietylen	<b>27 346 902 zł</b>

Koszty LCC odcinka Rybnik Towarowy- Bocznicia Kłokocin na 35 lat zostały przedstawiono w Tabeli 14. LCC na 35lat na odcinek Rybnik Towarowy- Bocznicia Kłokocin przedstawia porównywalne koszty dla podkładów betonowych jak i polimerowych. Niekorzystnie wychodzi analiza zabudowa na podkładach poliuretanowych.

Będzie to zdecydowanie czynnik eliminujący te podkłady z propozycji zabudowy.

*Tabela 14. Koszty cyklu życia podkładów na 35 lat na odcinku Rybnik Towarowy- Bocznicia Kłokocin*

<b>Koszt życia produktu w zł</b>	
Drewno	<b>14 643 528 zł</b>
Beton	<b>11 787 360 zł</b>
Poliuretan	<b>20 749 721 zł</b>
Polietylen	<b>12 710 061 zł</b>

Analiza wymiany podkładów dla wybranych torów bocznicia Kłokocin (tory opisane w Tabeli 11).

W Tabeli 15. przedstawiono zestawienie kosztów wymiany podkładów na wybranych torach bocznicia Kłokocin. Analizując same koszty zakupu (koszty pierwsze) analiza nie sprzyja innowacyjnym podkładom polimerowym. Koniecznym było do pełnej analizy wyliczyć LCC na 150 i 35 lat dla wszystkich 4 rodzajów produktów.

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

LCC na 150 lat dla wybranych torów kolejowych Bocznicy Kłokocin przedstawione w Tabeli 16. Przedstawia zasadność ekonomiczną zastosowania innowacyjnych podkładów polimerowych wykonanych z polietylenu.

LCC na 150 lat dla podkładów polietylenowych dla wybranych torów kolejowych bocznicy= 3,6 mln zł gdzie LCC na 150 lat dla podkładów betonowych dla wybranych torów kolejowych bocznicy= 4,0 mln zł. Równie korzystnie wypadło LCC na 35lat dla wybranych torów bocznicy kolejowe Kłokocin.

LCC na 35 lat dla podkładów polietylenowych dla wybranych torów kolejowych bocznicy = 1,7 mln zł gdzie LCC na 35 lat dla podkładów betonowych dla wybranych torów kolejowych bocznicy= 1,6 mln zł. Polietylen zdecydowanie wypada korzystniej w porównaniu z poliuretanem, tam LCC na 35 lat dla podkładów poliuretanowych dla wybranych torów kolejowych bocznicy= 2,7 mln zł.

*Tabela 15. Koszty wymiany podkładów na odcinku Rybnik Towarowy- Bocznicza Kłokocin*

<b>MONTAŻ</b>					
Rodzaj podkładu	Cena za zakup pierwszego podkładu (za sztukę)	Koszt pierwszego zakupu podkładów na 1km toru	Koszt montażu za 1 sztukę	Koszt montażu na 1km toru	Suma kosztów montażu (materiał + usługa)
<b>Drewno</b>	436 zł	654 000 zł	170 zł	255 000 zł	909 000 zł
<b>Beton</b>	330 zł	495 000 zł	170 zł	255 000 zł	750 000 zł
<b>Poliuretan</b>	1 660,75 zł	2 491 125 zł	170 zł	255 000 zł	2 746 125 zł
<b>Polietylen</b>	951,41 zł	1 427 115 zł	170 zł	255 000 zł	1 682 115 zł

*Tabela 16. Koszty cyklu życia podkładów dla 150 lat dla wybranych torów bocznicy Kłokocin*

<b>Koszt życia produktu w zł</b>	
Drewno	<b>6 054 000 zł</b>
Beton	<b>3 990 000 zł</b>
Poliuretan	<b>9 138 375 zł</b>
Polietylen	<b>3 619 230 zł</b>

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

Tabela 17. Koszty cyklu życia podkładów na 35 lat na wybranych torach bocznicy Kłokocin

<b>Koszt życia produktu w zł</b>	
Drewno	<b>1 938 000 zł</b>
Beton	<b>1 560 000 zł</b>
Poliuretan	<b>2 746 125 zł</b>
Polietylen	<b>1 682 115 zł</b>

4.9. Analiza środowiskowych aspektów stosowania polimerowych podkładów kolejowych na infrastrukturze kolejowej zarządzanej przez spółkę Infra Silesia S.A.

Jak wynika z analizy literatury, aby rozwijać gospodarkę przy jednoczesnej ochronie środowiska, konieczne jest projektowanie polityk opartych na koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Takie założenia recyklingu i odzysku wymagają od społeczeństwa racjonalnej i ekologicznej postawy wobec wytwórców wyrobów, a wytwórcy wyrobów powinni uwzględniać tę koncepcję już na etapie projektowania. Należy dążyć do stosowania jak najbardziej efektywnych technik odzysku i unieszkodliwiania/recyklingu zużytych produktów. Ponadto recykling jest wielką szansą dla zrównoważonej gospodarki. Obecny rozwój gospodarczy wymaga stale rosnącego zużycia surowców i energii. Wydobycie surowców i zwiększone zużycie energii skutkują zwiększonym zanieczyszczeniem i zniszczeniem środowiska. Jako skuteczne narzędzie wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym, polityka cyklu życia produktu jest niezbędna do zapewnienia rozwoju przy jednoczesnej ochronie środowiska i zasobów naturalnych. Surowce wtórne z odpadów konsumpcyjnych i poprodukcyjnych będą stopniowo zastępować mineralne źródła energii. Recykling i upcykling to najlepsze rozwiązania klimatyczne. [38]

Konieczne jest zastosowanie zrównoważonych, ekonomicznych i niezawodnych materiałów na podkłady kolejowe, aby przezwyciężyć liczne wady materiałów, które są obecnie stosowane do produkcji podkładów, takie jak niedobór drewna, korozja stali i niska trwałość betonu w środowisku chemicznym. Opracowano kilka rodzajów podkładów kolejowych wykorzystujących jako alternatywę różne materiały kompozytowe, naśladując reakcje strukturalne drewnianych podkładów kolejowych [44]. Obecnie postęp technologiczny w połączeniu z dziesięcioleciem badań zaowocował ulepszonymi

produktami, które łagodzą wiele z tych ograniczeń, czyniąc te opcję potencjalnie atrakcyjniejszą dla przemysłu kolejowego.

Strategia długofalowego użytkowania podkładów betonowych i drewnianych ma wiele wad:

- Wydobywanie surowców z obszarów naturalnych
- Zużywanie nieodnawialnych surowców naturalnych (cement, kruszywa, woda, drewno)

Komisja Europejska ogłaszając wieloletnie programy działań w zakresie środowiska (EAP), wyraźnie wymienia przyszłe wnioski ustawodawcze i cele unijnej polityki ochrony środowiska- wszystkie te cele będą sukcesywnie wdrażane, a jak deklaruje firma DB Cargo Polska S.A. oraz Infra Silesia S.A. w Raporcie Zrównoważonego Rozwoju Grupy DB Cargo Polska za lata 2019 i 2020: Grupa DB Cargo Polska przywiązuje dużą wagę do kwestii związanych ze zrównoważony rozwojem i społeczną odpowiedzialnością. W Raporcie Prezes Marek Staszek wymienia wiele podjętych inicjatyw zmierzających ku ochronie środowiska naturalnego a w samym Raporcie znajdziemy również deklaracje konsekwentnego dążenia do zmniejszania wpływu swojej działalności na środowisko naturalne przez grupę DB Cargo Polska.

Mając na uwadze destrukcyjny wpływ tradycyjnie wytwarzanych podkładów kolejowych na środowisko naturalne jak również pozytywne aspekty stosowania podkładów polimerowych (zmniejszenie ilości odpadów poprzez recykling odpadów polietylenowych na podkłady) niniejsza dysertacja zaleca stosowanie podkładów polimerowych wykonanych z polietylenu co idealnie wpisuje się w politykę grupy DB Cargo Polska.

#### 4.10. Analiza prawna zastosowania podkładów polimerowych na infrastrukturze kolejowej zarządzanej przez firmę Infra Silesia S.A.

W analizowanym dokumencie wybrano 2 miejsca możliwe do zastosowania innowacyjnych podkładów polimerowych:

- Odcinek łączący stacje Rybnik Towarowy i bocznice Rybnik Kłokocin
- Zbiór wybranych torów znajdujących się w obszarze bocznic Kłokocin

Odcinek łączący stacje Rybnik Towarowy i bocznice Rybnik Kłokocin składa się z dwóch linii- 211 i 211d. Obie te linie znajdują się w jurysdykcji spółki Infra Silesii S.A. jako

Zarządcy Infrastruktury. Wg regulacji prawnych- linie zarządzane przez spółkę Infra Silesia S.A. nie podlegają TSI.

Bocznic kolejowa Rybnik Kłokocin DB Cargo Polska S.A. usytuowana jest w Rybniku przy ul. Kłokocińskiej 51. Właścicielem bocznic jest spółka DB Cargo Polska S.A. Użytkownik bocznic opracował statut sieci kolejowej nadający jest status infrastruktury prywatnej.

Z wyżej przytoczonych uwarunkowań prawnych wnioskujemy, że w obu przypadkach zarządca infrastruktury powinien kierować się ścieżką dla:

b). Linii kolejowych nieobjętych wymaganiami TSI oraz bocznic kolejowych będących infrastrukturą prywatną lub bocznic nie będących infrastrukturą prywatną, które nie podlegają modernizacji czy odnowieniu lub dopuszczone do eksploatacji przed 28.VII.2021 r. zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 20.

W takiej sytuacji zastosowanie mają przepisy ustawy z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym. Art. 22f ust. 1 u.t.k. wskazuje bowiem, że warunkiem dopuszczenia do eksploatacji typów budowli i typów urządzeń mających wpływ na poziom bezpieczeństwa ruchu kolejowego, o których mowa w przepisach wydanych na podstawie ust. 14 pkt 2, jest uzyskanie świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu dla pierwszego ich egzemplarza. Jak wskazuje ust. 14 pkt 2 ww. przepisu minister właściwy do spraw transportu określi, w drodze rozporządzenia wykaz rodzajów budowli, urządzeń oraz pojazdów kolejowych, dla których wymagane jest uzyskanie świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu. Aktem wykonawczym zawierającym powyższy wykaz jest Rozporządzenie 2014.

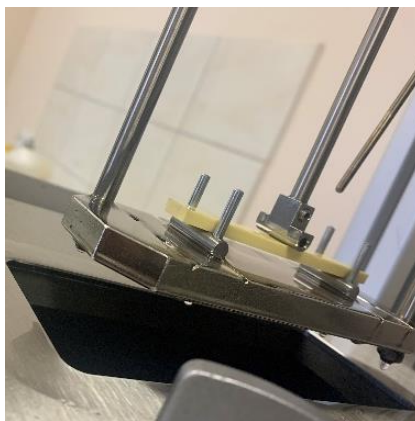
Zatem powyższa procedura odnosić się będzie zarówno do podkładów kolejowych wykorzystywanych na liniach kolejowych nieobjętych wymaganiami TSI (linia 211 i 211d składające się na odcinek Rybnik Towarowy- Bocznic Kłokocin), jak również wyżej wymienionych bocznic kolejowych (do których zalicza się bocznic Kłokocin).

Tym samym powyższe przepisy wprowadzają procedurę oceny zgodności budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych, których zasady wprowadzenia do obrotu i dopuszczenia do eksploatacji nie zostały ustanowione na poziomie przepisów europejskich

## **5. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ**

### **5.1. Temperatura ugięcia pod obciążeniem HDT**

Układ próbki zaprezentowano na Rysunku 64.



*Rysunek 66. Próbka podkładu poliuretanowego przygotowana do badania temperatury ugięcia HDT przed zanurzeniem w medium grzewczym*

*Tabela 18. Wyniki badania temperatury ugięcia pod obciążeniem HDT*

<b>Rodzaj materiału</b>	<b>Temp początkowa (w °C)</b>	<b>Temp maksymalna zadana na urządzeniu (w °C)</b>	<b>Temperatura ugięcia pod obciążeniem (w °C)</b>
<b>PE</b>	<b>25</b>	<b>150</b>	<b>47,2</b>
<b>PU</b>	<b>25</b>	<b>200</b>	<b>150,3</b>

Polietylen wykazał się gorszymi parametrami, jego temperatura, w której ulegnie trwałemu odkształceniu to zaledwie 47°C. Próbka podkładu poliuretanowego wykazała znacznie wyższą, w porównaniu do podkładu z PE, wartość HDT która wyniosła 150°C. Podkład wykonany z PU jest bardziej odporny na odkształcenie, co związane jest zarówno z właściwościami termicznymi poliuretanu jak i zastosowanym wzmocnieniem w postaci włókna szklanego.

Badanie HDT - temperatury odkształcenia cieplnego, to test wytrzymałości materiałów termoplastycznych na wysoką temperaturę (Rysunek 64). Wyniki badań pozwalają określić wartość punktu, przy którym dany materiał zaczyna ulegać odkształceniom pod wpływem wysokiej temperatury, zwiększającej się ze stałą szybkością. Wyniki badań HDT są

wyrażane w stopniach Celsjusza i są określone dla różnych obciążeń, zazwyczaj w granicach 0,45 MPa do 1,82 MPa.

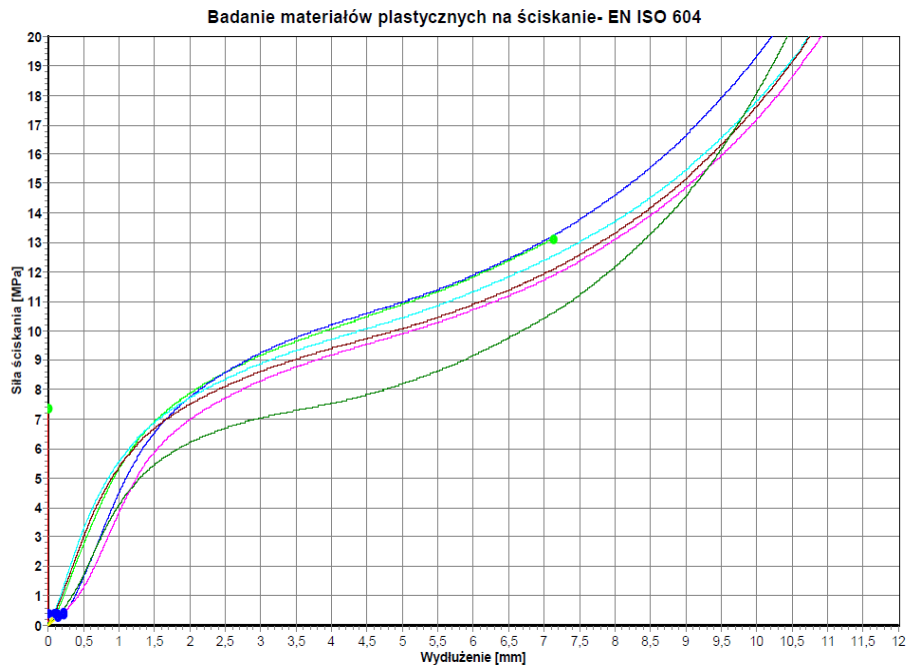
Podsumowując, wyniki badań HDT pozwalają na ocenę wytrzymałości materiałów termoplastycznych na wysoką temperaturę, co jest niezwykle ważne w wielu dziedzinach, w tym w przemyśle motoryzacyjnym, elektronicznym czy kolejowym. Na podstawie analizy wyników badań temperatury ugięcia pod obciążeniem stwierdzono znaczącą różnicę temperatury ugięcia pod obciążeniem HDT (Tabela 18). Na próbce pobranej z podkładu polimerowego wykonanego z polietylenu Temperatura ugięcia pod obciążeniem wyniosła 47,2 st. C z kolei dla poliuretanu wyniosła 150,3 st. C. Stwierdzona różnica temperatury ugięcia pod obciążeniem była wyższa o 200% w przypadku poliuretanu w porównaniu do polietylenu. Powyższe wyniki wskazują na większą odporność podkładów poliuretanowych na temperaturę ugięcia pod obciążeniem względem polietylenu.

Powyższe wyniki można uzasadnić większą odpornością temperaturową materiałów chemoutwardzalnych (PU) względem materiałów termoplastycznych (PE).

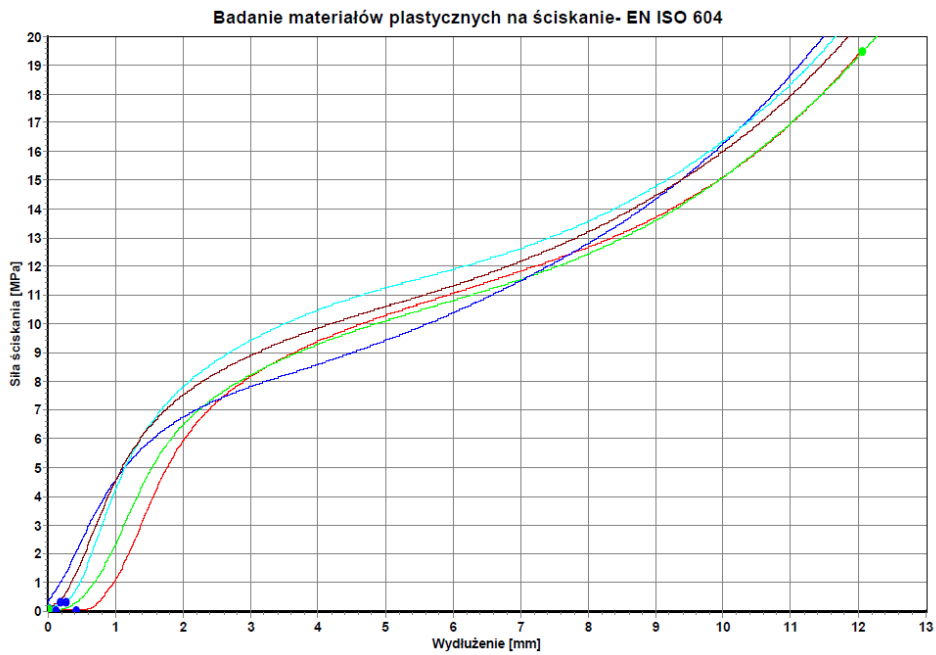
## 5.2. Wytrzymałość na ściskanie

Wykresy wytrzymałości na ściskanie materiałów polimerowych przedstawiają ich zdolność do utrzymania obciążenia podczas ściskania wzdłuż osi prostopadłej do kierunku aplikacji siły. Wykresy przedstawione na Rysunkach 40-45 mają charakterystyczną krzywą, która opisuje zachowanie się materiału w czasie procesu ściskania. Przebieg wykresu wytrzymałości na ściskanie zależy od wielu czynników, w tym od rodzaju i struktury polimeru, stopnia krystaliczności, warunków procesu produkcji, a także od właściwości chemicznych materiału. Czynniki atmosferyczne takie jak temperatura, wilgotność, ciśnienie i prędkość obciążenia, również mogą wpływać na przebieg krzywej.

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*



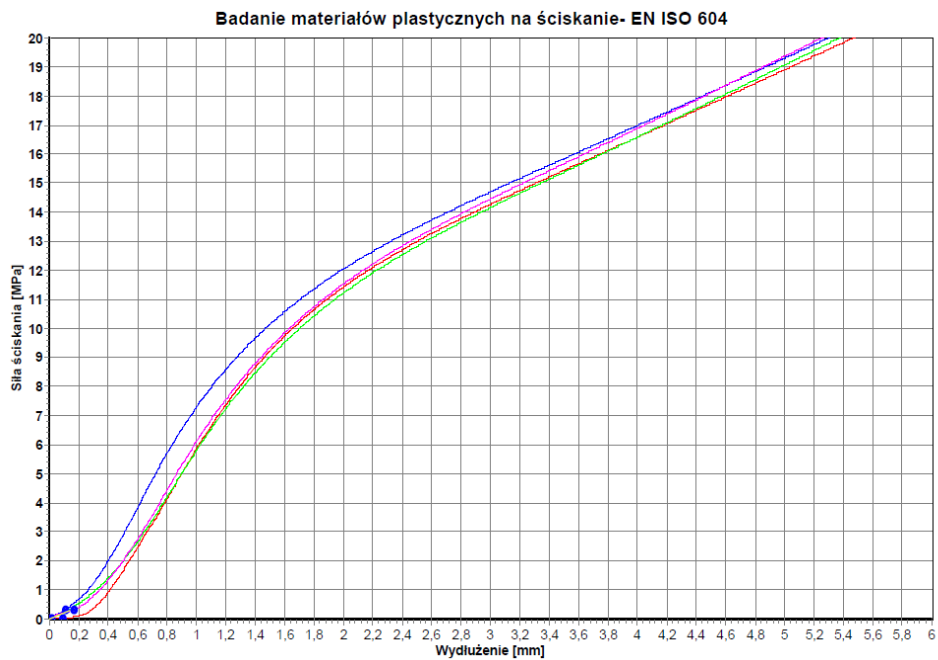
Rysunek 67. Wykres badania ściskania próbek PE R przed ekspozycją w komorze klimatycznej



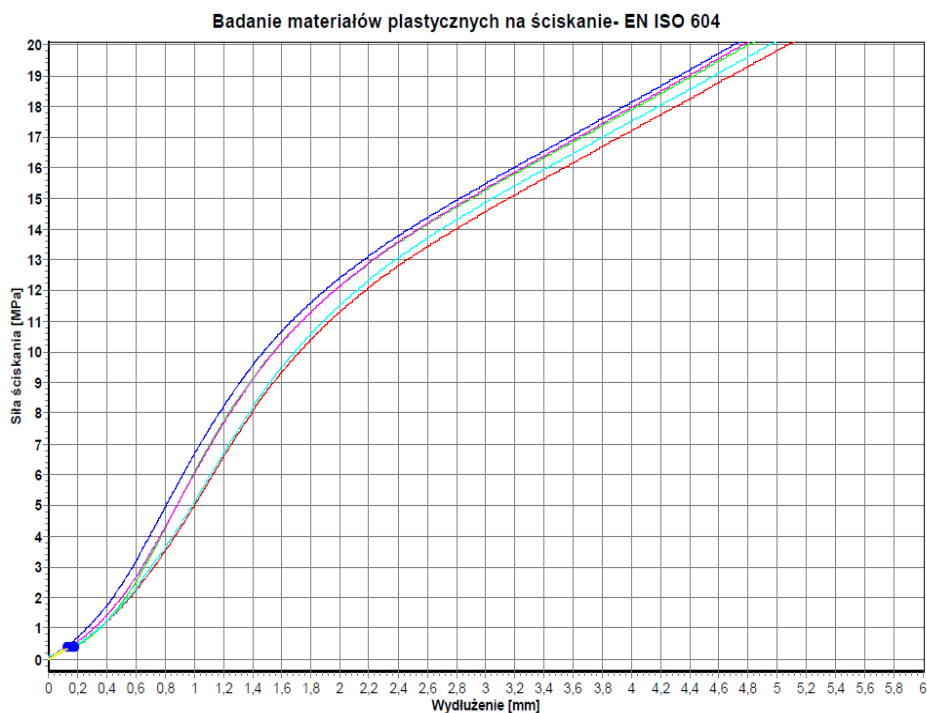
Rysunek 68. Wykres badania ściskania próbek PE R po ekspozycji w komorze klimatycznej



*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

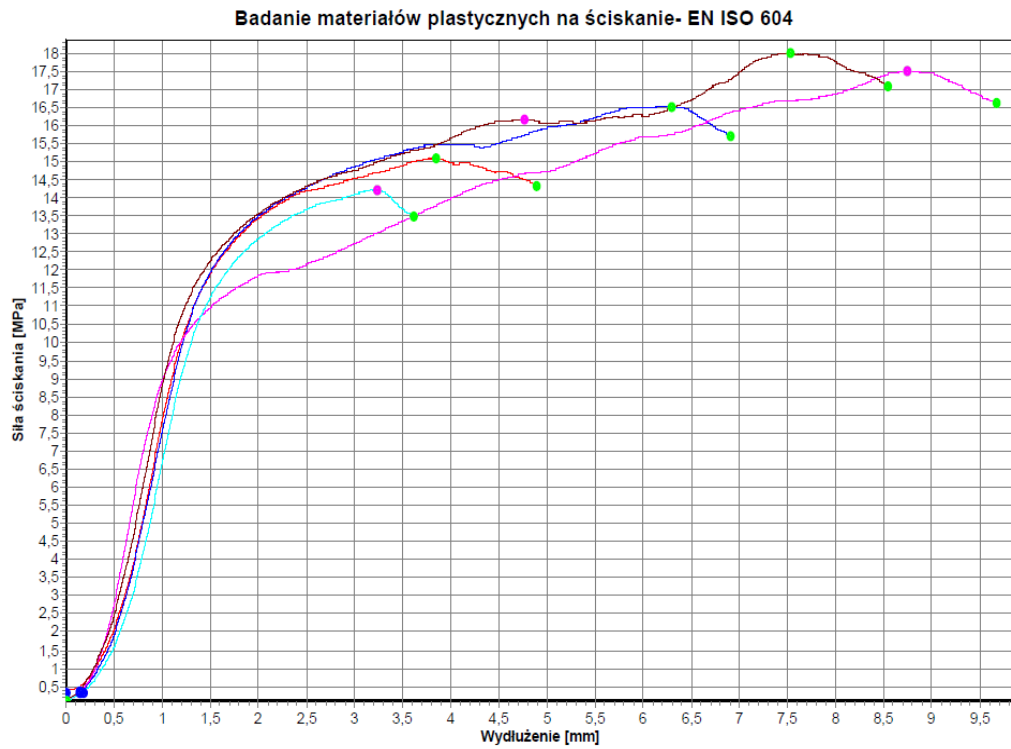


Rysunek 69. Wykres badania ściskania próbek PE B przed ekspozycją w komorze klimatycznej

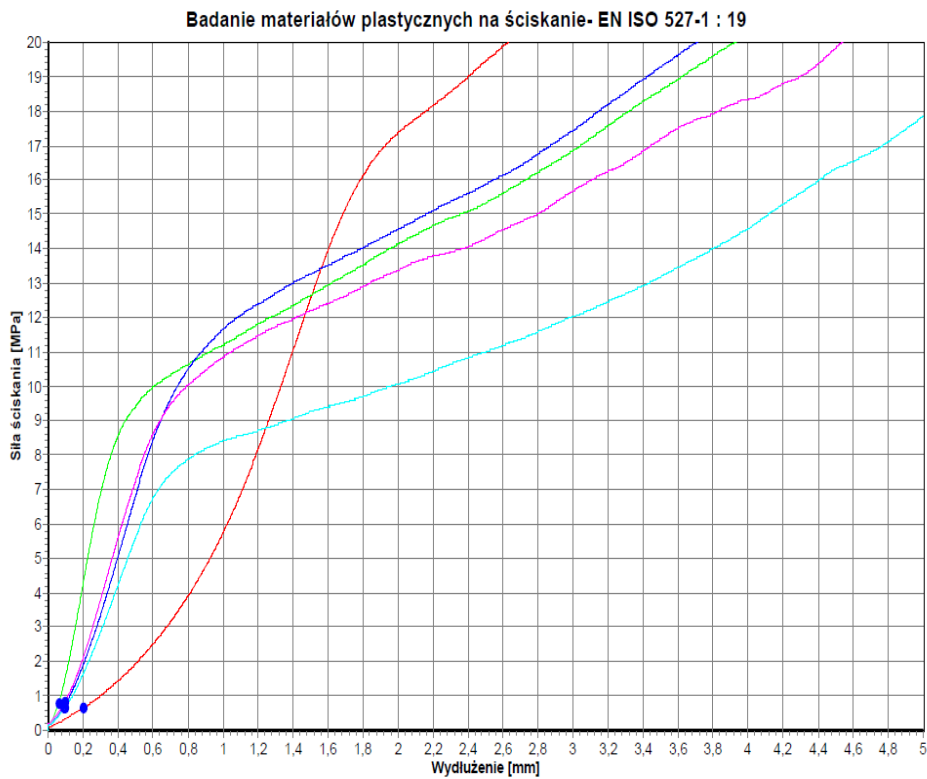


Rysunek 70. Wykres badania ściskania próbek PE R po ekspozycji w komorze klimatycznej

Próbki podkładów z PE po ekspozycji w komorze klimatycznej uzyskują wytrzymałość na ściskanie zbliżoną do próbek nie ekspozycyjnych jednak osiągają one zbliżone wartości przy niższym odkształceniu badanej próbki.



Rysunek 71. Wykres badania ściskania próbek PU przed ekspozycją w komorze klimatycznej



Rysunek 72. Wykres badania ściskania próbek PU po ekspozycji w komorze klimatycznej

Próbki podkładów wykonanych z PU poddane ekspozycji w komorze klimatycznej nie ulegają osłabieniu pod względem wartości wytrzymałości na ściskanie. Analizując przebieg wykresu dla próbek po ekspozycji można stwierdzić, że są bardziej elastyczne w próbie ściskania niż próbki nie eksponowane. Należy zauważyć, że próbki po ekspozycji w komorze w próbie ściskania uległy zniszczeniu zarówno pęknięciom uległa struktura wewnętrzna podkładu jak i warstwa zewnętrzna. W przypadku poliuretanu wykres ściskania ma charakter rosnący, osiągając dla materiału przed komorą klimatyczną pewną wartość graniczną, zaś w przypadku materiału po komorze klimatycznej przypomina charakterystykę właściwą dla polietylenu. Powodem zmiany charakterystyki może być propagacja wody po włóknach szklanych zmniejszająca przyczepność na granicy faz osnowy i zbrojenia. Uniemożliwi to dalszą eksploatację podkładów poliuretanowych. Wyniki naprężenia podczas badania ściskania poliuretanu przed komorą zanotowano od 14,2 [MPa] do 17,5 [MPa], wartość średnia naprężenia= 12,9 [MPa] a odchylenie standardowe=6,4 [MPa]. Natomiast wyniki naprężenia podczas badania ściskania poliuretanu po komorze zanotowano od 63,0 [MPa] do 319,0 [MPa], wartość średnia naprężenia= 142,0 [MPa] jednakże przy bardzo wysokim odchyleniu standardowym=107,0 [MPa]. Na podstawie wyników badań materiałów polimerowych w postaci polietylenu i poliuretanu stwierdzono różnice w plastyczności materiału. Próbki wykonane z poliuretanu (przed komorą) cechują się mniejszą plastycznością i większą kruchością w porównaniu do próbek wykonanych z polietylenu. Próbki wykonane z poliuretanu testowane po ekspozycji w komorze klimatycznej cechują się większą plastycznością w porównaniu do próbek poliuretanowych nie poddanych ekspozycji na warunki klimatyczne i mają zbliżone cechy plastyczności do próbek polietylenowych. Zakumulowana energia wewnętrzna w postaci naprężeń wywołanych podczas badania za ściskanie ulega relaksacji podczas procesu wytrzymywania w komorze klimatycznej co skutkuje zmianą wymiarów zewnętrznych próbki, w szczególności w przypadku polietylenu [37], [38].

Zaobserwowano różnice plastyczności materiału wynikające z miejsca pobrania próbki, ze środka lub obrzeża podkładu.

### 5.3. Wytrzymałość na zginanie

Badanie zginania pozwala na ocenę wytrzymałości na zginanie badanych materiałów w funkcji odkształcenia. Podkłady z PE wykazują wyższą wytrzymałość przy zginaniu niż próbki podkładów PE które nie były poddane ekspozycji. Ponadto najwyższa wartość wytrzymałości na zginanie zarejestrowana została przy większej wartości odkształcenia niż dla próbek nie poddanych ekspozycji. Warunki ekspozycji w komorze klimatycznej nie wpłynęły negatywnie na materiał PE. Dla podkładów wykonanych z PU ekspozycja w komorze klimatycznej pozwoliła na zwiększenie wytrzymałości na zginanie. Zwiększeniu uległo także odkształcenie, przy którym wystąpiło uszkodzenie badanej próbki. Po ekspozycji w komorze klimatycznej próbki podkładu z PU wykazują wyższą wytrzymałość na zginanie. Wytrzymałość na zginanie materiału PE średnio wyszła 14,69 MPa co oznacza, że podkład jest mieszanką polietylenów. Gdyż wyniki wzorcowe dla HDPE byłyby ok 20-26MPa a LDPE = 8-12 MPa.

Porównanie wykresów zginania

PE przed komorą (średnia wartość w MPa): 14,69+|- 0,46

PE po komorze (średnia wartość w MPa): 15,66 +|- 0,32

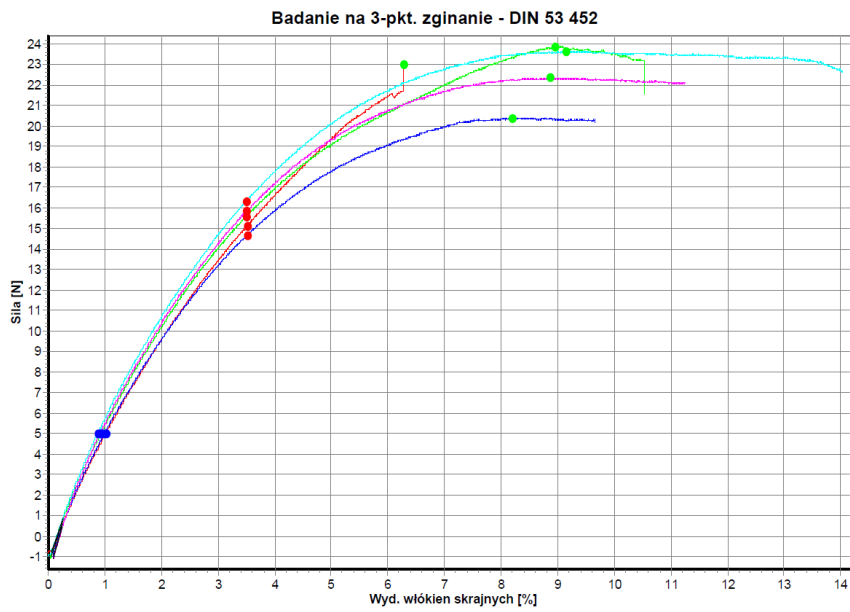
Nieznaczny wzrost wytrzymałości, który może być wytłumaczony różnicą w próbkach.

Można wysnuć wniosek, że komora ma znikomy wpływ na właściwości materiału PE pod kątem wytrzymałości na zginanie.

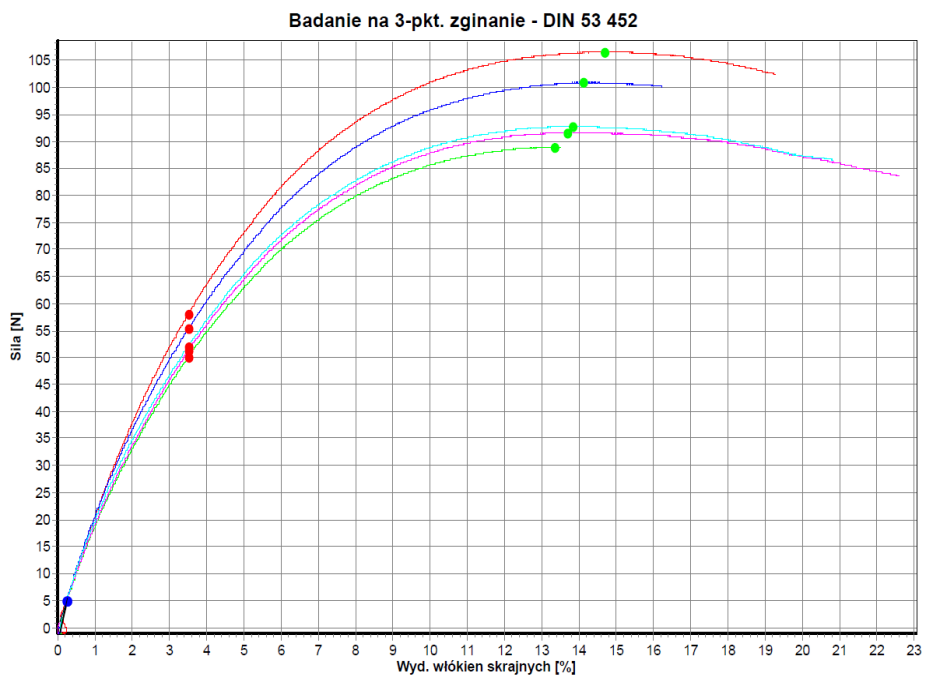
RbB (wytrzymałość na zginanie) dla materiału PU wynosił przed komorą 88-193 MPa a po komorze 91-137 MPa. Moduł dla PU wynosił przed komorą 6800 a po komorze 4200-12000. Tutaj zaobserwowano, że cykle mają większy wpływ na materiał.

Wilgoć przez kapilarne chłapięcej włókien szklanych penetrowała materiał o powodowała delaminację. W warunkach środowiskowych PE jest stabilniejszy. UV również ma marginalne znaczenie na PE i PU gdyż działa tylko na powierzchni

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

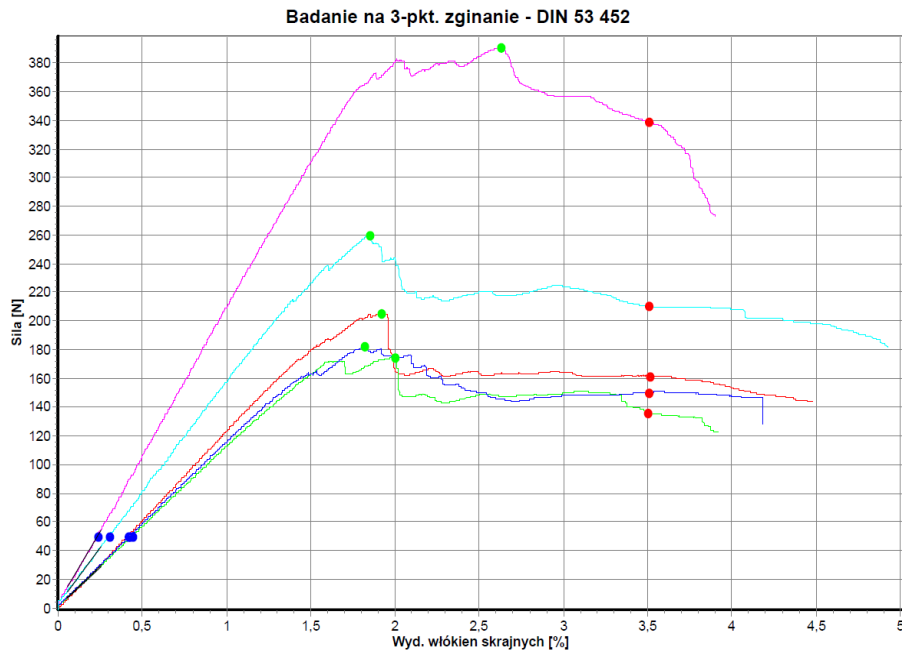


Rysunek 73. Wykres zginania próbek polietylenowych przed ekspozycją w komorze klimatycznej

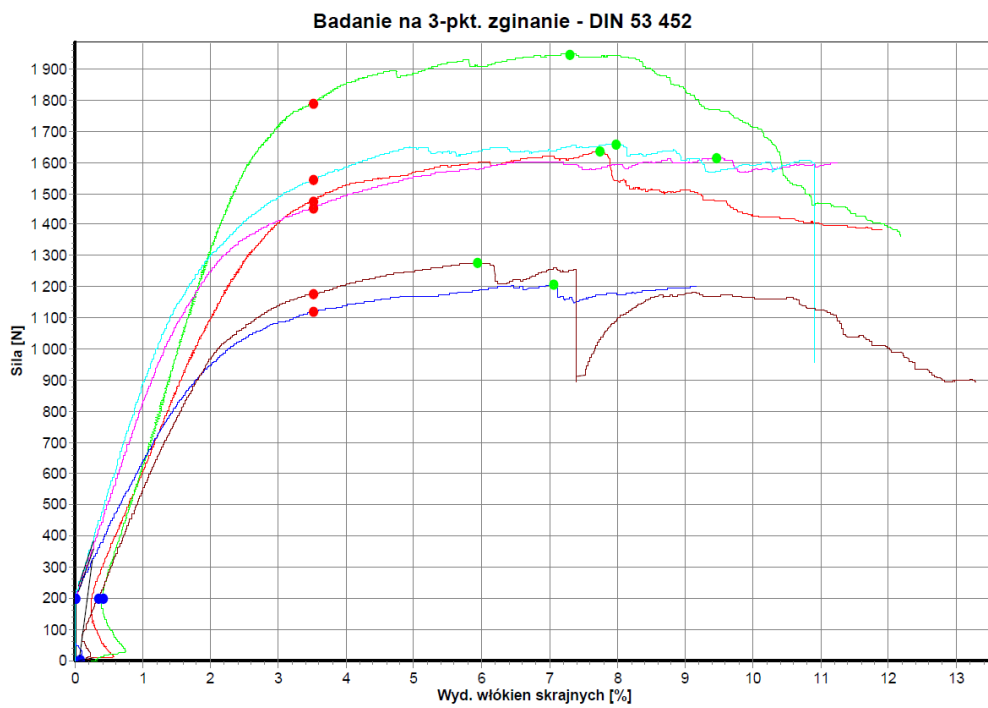


Rysunek 74. Wykres zginania próbek polietylenowych po ekspozycji w komorze klimatycznej

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*



Rysunek 75. Wykres zginania próbek poliuretanowych przed ekspozycją w komorze klimatycznej



Rysunek 76. Wykres zginania próbek poliuretanowych po ekspozycji w komorze klimatycznej

#### 5.4. Ekspozycja w komorze klimatycznej

Po przeprowadzonym badaniu polegającym na ekspozycji próbek (polietylenowych i poliuretanowych) na symulowane zmienne warunki atmosferyczne w komorze klimatycznej materiał polietylenowy nie pokazywał zmian w strukturze, kolorze czy swoim stanie (Rys. 75).



*Rysunek 77. Blok podkładu polietylenowego po ekspozycji w komorze klimatycznej*

Stwierdzona została różnica w szerokości tworzywa polietylenowego względem pręta stalowego.

Pomiary:

	POMIAR 1	POMIAR 2
Tworzywo	97,45 mm	95,91 mm
Metal	99,22 mm	97,43 mm
Różnica	1,77 mm	1,52 mm



*Rysunek 78. Blok podkładu poliuretanowego po ekspozycji w komorze klimatycznej*

Próbki poliuretanowe badane w komorze klimatycznej cechowały się licznymi pęknięciami. Poprzez kapilarne chłonięcie wilgoci przez włókna szklane do wnętrza materiału doszło do stopniowego rozdzielania się obu materiałów (Rys. 76). Nastąpiło rozwarstwienie poliuretanu wzdłuż włókien szklanych.

#### 5.5. Skaningowa kalorymetria różnicowa (DSC)

Dla podkładów PU (kompozyt FFU) nie zaobserwowano przemian fazowych w przebiegu zarejestrowanych krzywych DSC (Rys. 80, Rys. 81 i Rys. 82). Próbki bez jak i z zabiegiem eksponowania w komorze klimatycznej mają zbliżony charakter wykresów, których przebiegi nie różnią się znacząco od siebie. Za przebieg linii odpowiedzialne mogą być obecne w materiale włókna strukturalne.

Dla podkładów PE obserwuje się przemianę związaną z topnieniem PE. Obserwuje się topnienie w przebiegu krzywej DSC zarejestrowanej podczas pierwszego grzania i drugiego grzania. Topnienie PE ujawnia się jako przemiana endotermiczna z dwoma pikami przy wartościach temperatury wynoszącej: ok 110C i ok 124C (w pierwszym grzaniu) oraz ok. 109C i 122C (w drugim grzaniu). Na krzywej DSC z pierwszego grzania (Rys. 77) widoczne jest topnienie dodatkowego składnika tworzywa - założono, że jest to polipropylen (PP) (temperatura topnienia w pierwszym grzaniu ok. 147-151°C). Występowanie na zarejestrowanych krzywych DSC endotermii związanej z topnieniem PP prawdopodobnie wynika z zastosowania przez producenta podkładu materiału w postaci recyklatu polietylenowego, który był zanieczyszczony polipropylenem.

Na krzywej DSC z chłodzenia (Rys. 78) obserwowana jest reakcja endotermiczna PE związana z krystalizacją. Wartość temperatury krystalizacji wynosi ok. 110C, 97C i 63C.

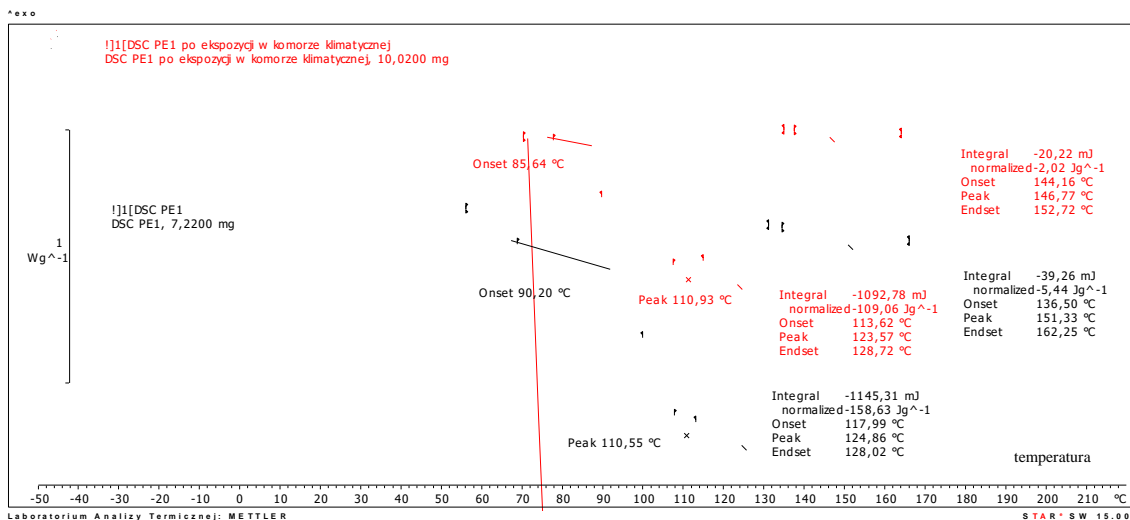


Zachowanie się podkładów z PE w etapie chłodzenia takie jak zarejestrowano na krzywych DSC jest typowe dla PE (mieszanek PE).

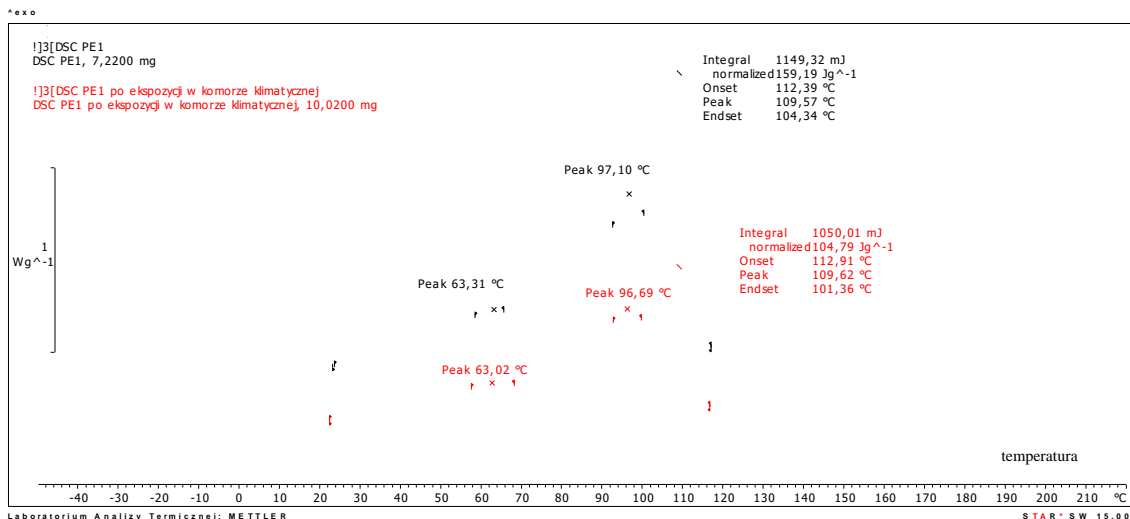
Z uwagi na fakt, że badane podkłady PE są wytwarzane z tworzywa z recyklatów odstąpiono od omawiania (porównywania) wartości ciepła zarejestrowanych przemian. Decyzja spowodowana była zarówno małą próbką pobieraną do badań (ok. 10mg) jak również możliwością zmienności jakości składu tworzywa zastosowanego do wytworzenia podkładu (dwie próbki mogły być pobrane z materiału przetwarzanego inną ilość razy). Dodatkowo materiał wsadowy użyty do produkcji mógł pochodzić z innych źródeł co również ma wpływ na oznaczoną wartości entalpii.

Wykresy DSC (Differential Scanning Calorimetry) przedstawiają zmiany ciepła w materiale podczas stopniowego ogrzewania i ochładzania go w kontrolowanych warunkach. Na osi poziomej wykresu umieszczona jest temperatura, a na osi pionowej - ilość ciepła absorbowanego lub uwalnianego przez materiał.

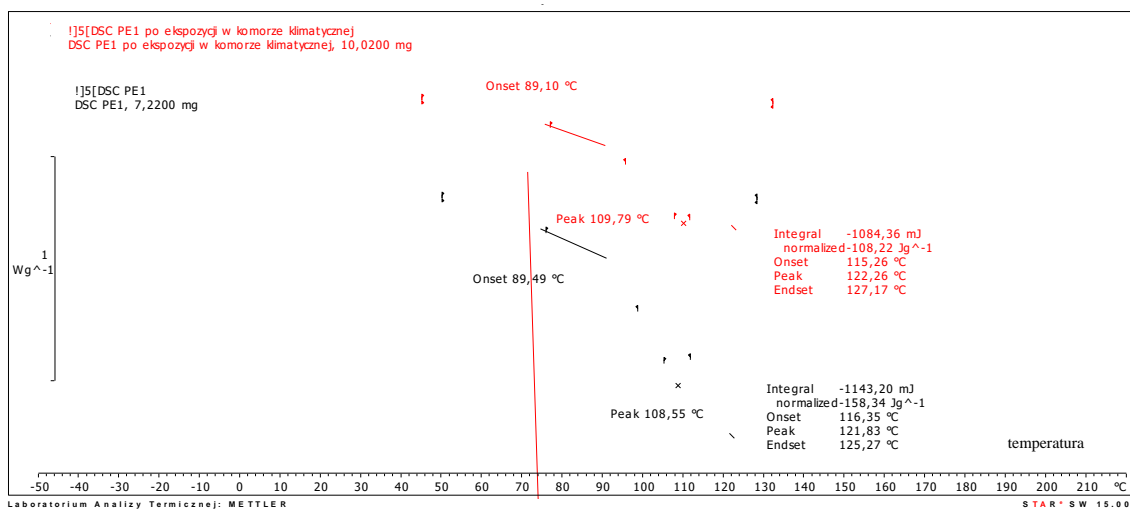
*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*



Rysunek 79. Zestawienie wykresów pierwszego grzania próbek PE przed i po komorze

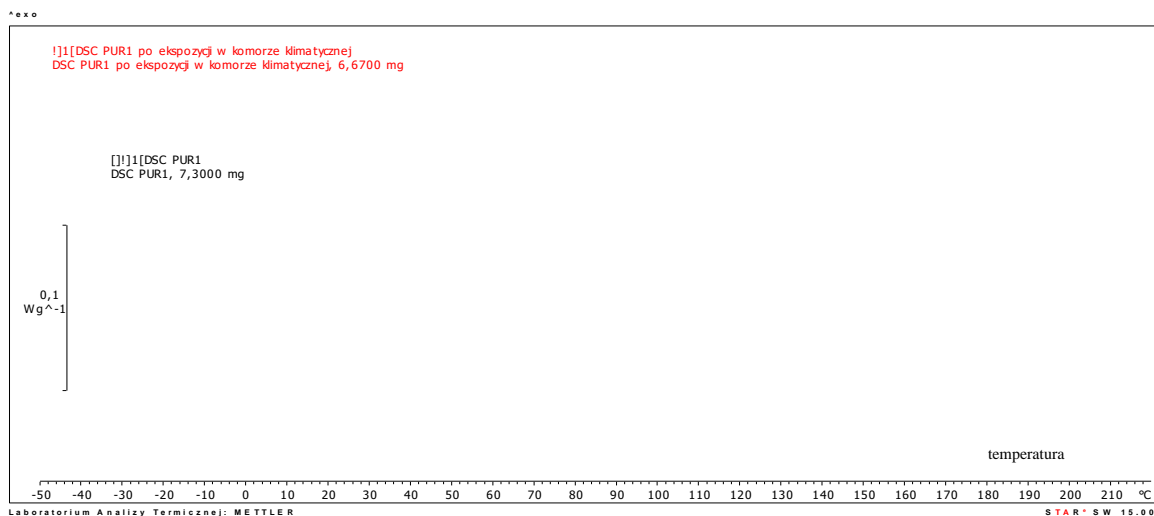


Rysunek 80. Zestawienie wykresów chłodzenia próbek PE przed i po komorze

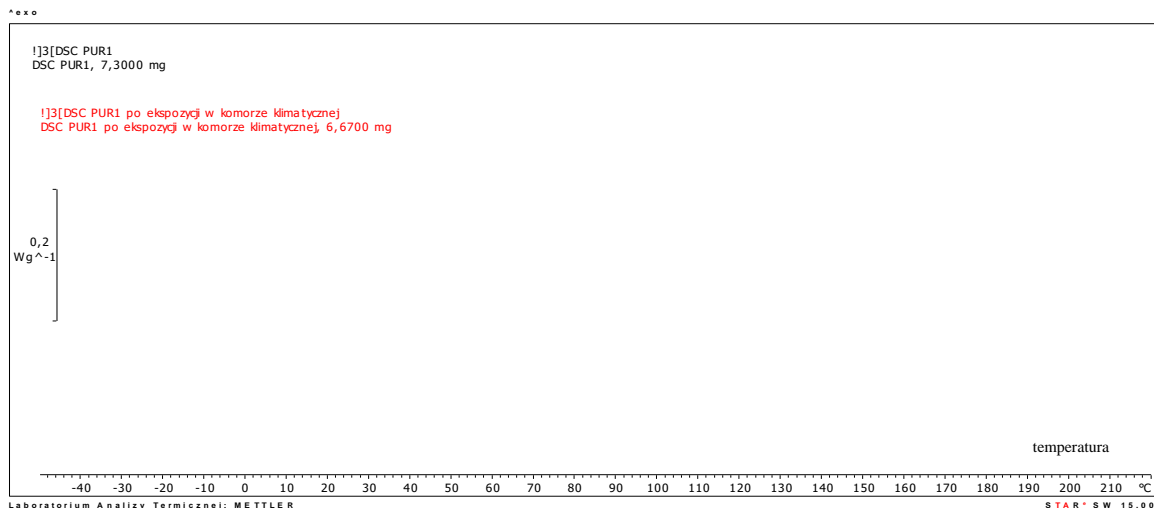


Rysunek 81. Zestawienie wykresów drugiego grzania próbek PE przed i po komorze

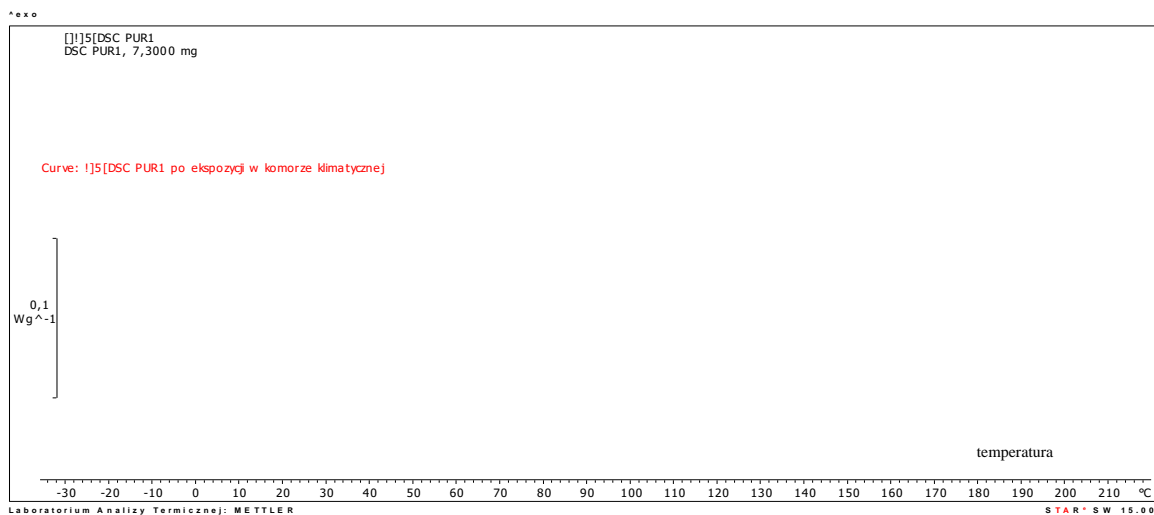
*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*



*Rysunek 82. Zestawienie wykresów pierwszego grzania próbek PU przed i po komorze*



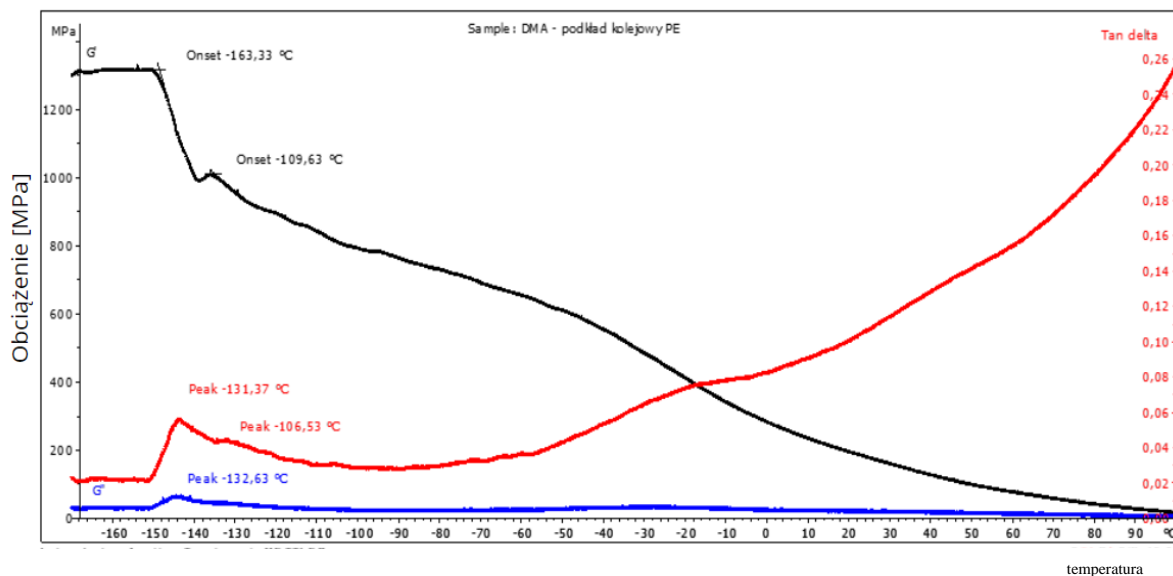
*Rysunek 83. Zestawienie wykresów chłodzenia próbek PE przed i po komorze*



*Rysunek 84. Zestawienie wykresów drugiego grzania próbek PE przed i po komorze*

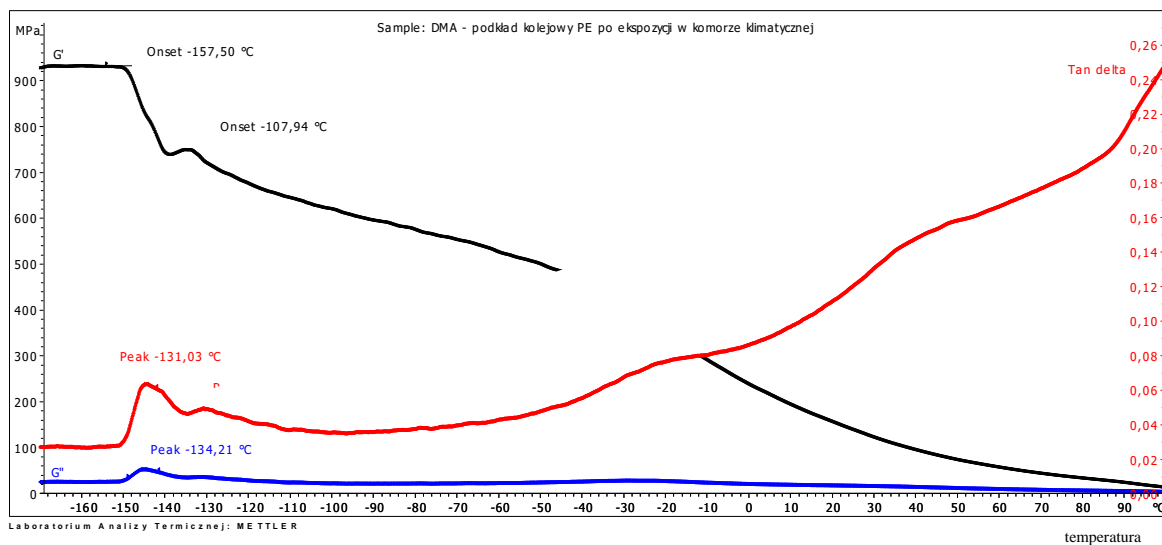
## 5.6. Dynamiczna analiza mechaniczna (DMA)

Krzywe zarejestrowane podczas prowadzenia dynamicznej analizy mechanicznej (DMA) przedstawiają zależność między temperaturą a modułem zachowawczym ( $G'$ ) oraz modułem stratności ( $G''$ ). Zarejestrowano również wartość współczynnika stratności mechanicznych ( $\tan \delta$ ) w zależności od temperatury. Wartości wyznaczonych modułów są wynikiem prowadzonej analizy metodą dynamiczną z zastosowaniem określonej amplitudy siły, amplitudy przemieszczenia, odkształceniem materiału podczas deformacji wywoływanym sinusoidalnie. Wykresy DMA pozwalają na określenie właściwości lepkosprężystych materiałów w zależności od temperatury, częstotliwości i amplitudy obciążenia.



Rysunek 85. Wykres DMA próbki podkładu PE przed komorą

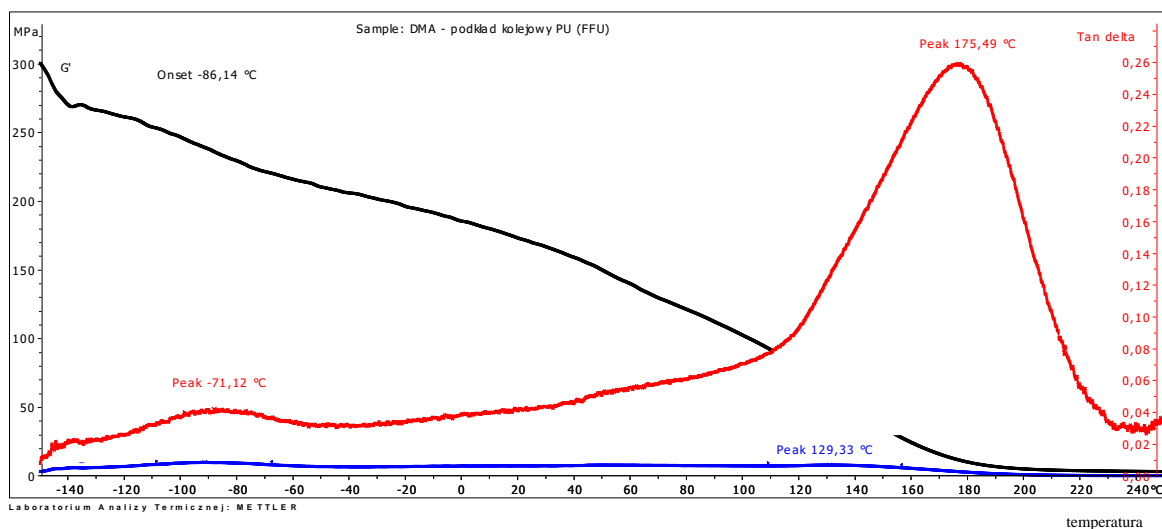
*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*



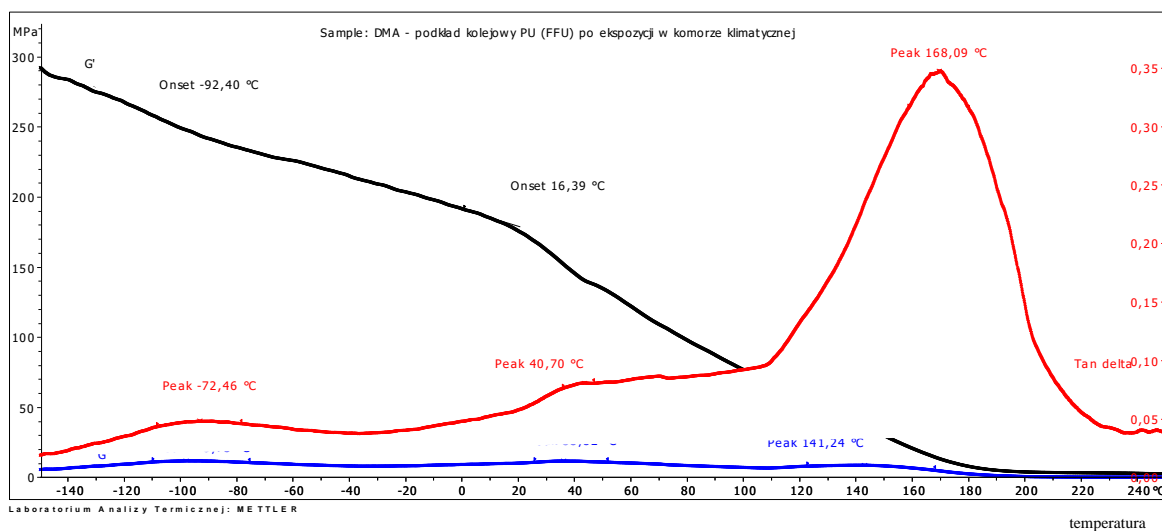
Rysunek 86. Wykres badania DMA próbki podkładu PE po komorze

Próbka podkładu PE nie wykazuje znaczących różnic w odniesieniu do wyznaczonej metodą DMA wartości temperatury zeszklenia dla próbki niepoddanej ekspozycji (wartość szczytowa  $\tan \delta = -131,4^{\circ}\text{C}$  i  $-106,5^{\circ}\text{C}$ ) w komorze klimatycznej do wartości tej temperatury wyznaczonej dla próbki poddanej ekspozycji (wartość szczytowa  $\tan \delta = -131,0^{\circ}\text{C}$  i  $-105,2^{\circ}\text{C}$ ). Występowanie dwóch wartości temperatury zeszklenia jest związane ze składem badanych próbek jest to mieszanina polietylenów, co potwierdzono w wynikach badań metodą DSC. Wartość modułu zachowawczego próbki po ekspozycji w komorze klimatycznej jest niższa niż próbki przed ekspozycją co może być wynikiem oddziaływania warunków ekspozycji na tworzywo polimerowe. Wielokrotne chłodzenie oraz ogrzewanie próbki podkładu doprowadziło do zestarzenia materiału co spowodowało obniżenie wartości modułu w porównaniu do wartości modułu dla próbki nie ekspozowanej w komorze klimatycznej.

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*



Rysunek 87. Wykres badania DMA próbki podkładu PU przed komorą



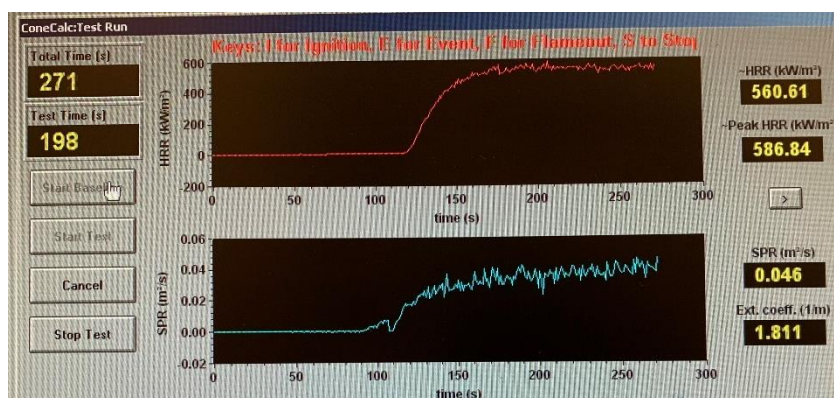
Rysunek 88. Wykres badania DMA próbki podkładu PU po komorze

Próbka podkładu PU wykazuje nieznaczne różnice w odniesieniu do wyznaczonej metodą DMA wartości temperatury zeszklenia dla próbki niepoddanej ekspozycji (wartość szczytowa  $\tan \delta = 175,5^{\circ}\text{C}$ ) w komorze klimatycznej do wartości tej temperatury wyznaczonej dla próbki poddanej ekspozycji (wartość szczytowa  $\tan \delta = 168,1^{\circ}\text{C}$ ). Poddanie próbki podkładu PU ekspozycji w zmiennych warunkach temperatury i wilgotności przyczyniło się do zmiany wartości temperatury zeszklenia oraz nieznacznej zmiany wartości modułu zachowawczego jako konsekwencji oddziaływania zastosowanych warunków ekspozycji, które wpłynęły na starzenie się tworzywa, którego następstwem są zaobserwowane zmiany wyznaczonych charakterystyk. Stwierdzone zmiany mogą świadczyć o zapoczątkowaniu zmian strukturalnych w PU będących wynikiem przemian chemicznych lub fizycznych zachodzących na skutek prowadzonej ekspozycji.

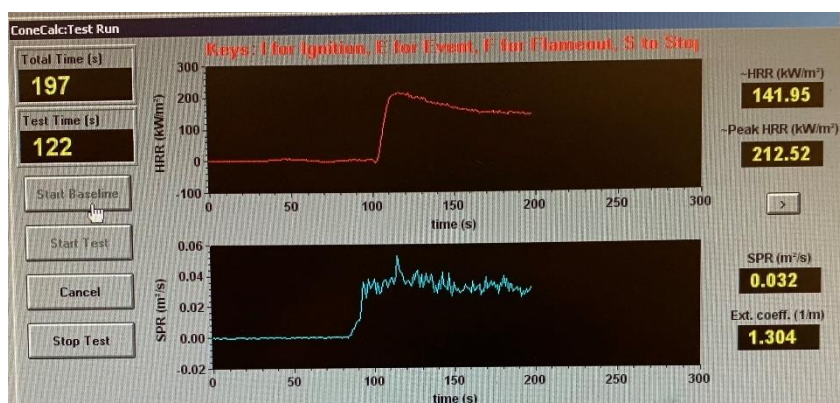
### 5.7. Test palności

W wyniku testu palności otrzymano różne charakterystyki spalania w zależności od rodzaju polimeru. Wykresy te pozwalają na określenie szybkości i intensywności spalania materiału, a także jego reakcji na ogień w zależności od czasu. Na wykresach spalania uwidoczniło, wzrost temperatury materiału wraz z czasem spalania, a także jakie produkty są uwalniane podczas procesu spalania Rysunek 62. Po 120s czasu palenia współczynnik HRR wzrasta do wartości 560,61 (kW/m<sup>2</sup>) a wartość maksymalna dla współczynnika HRR wynosił 586,84 (kW/m<sup>2</sup>).

Z przedstawionych na Rysunkach 87 i 88 danych można odczytać, iż całkowity czas potrzebny na spalenie próbki PE wynosił 271 [s] a próbki PU 197 [s].



Rysunek 89. Wykres spalania próbki podkładu z materiału polietylenowego PE



Rysunek 90. Wykres spalania próbki podkładu z materiału poliuretanowego PU

Badanie palności wykonane przy użyciu stożka kalometrycznego z analizatorem gazów uwolnionych podczas spalania pozwala na porównanie wybranych parametrów związanych z palnością badanych materiałów podkładów kolejowych. Podkłady z PE okazały się materiałem o znacznie wyższym średnim efektywnym ciepłe spalania niż podkłady z PU. Dla materiału z PE oznaczono średnie efektywne ciepło spalania wynoszące

41,7 MJ/kg a dla PU 21,5 MJ/kg. Ilość wydzielonego ciepła jest również znacznie wyższa dla PE niż dla PU i wynosi odpowiednio 401 i 69 MJ/m<sup>2</sup>. Podczas spalania próbki podkładu z PE wydzieliła się także większa całkowita ilość wydzielonego dymu wynosząca 4216 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> wobec 1849 dla PU. Gazy powstające podczas spalania podkładów z PE zawierały głównie dwutlenek węgla i tlenek węgla, których zawartość określono na 6231 ppm i 123 ppm. Nie stwierdzono obecności tlenu azotu, a inne możliwe do oznaczenia substancje nie występowały w większym stężeniu niż 2 ppm. Analiza gazów uwolnionych podczas spalania próbki podkładu z PU wykazała niższą zawartość dwutlenku węgla i tlenku węgla niż stwierdzona dla PE i wynosiła ona odpowiednio 3874 ppm i 167 ppm. Analiza gazów powstałych podczas spalania PU wykryła obecność chloru (2 ppm), cyjanowodoru (13 ppm), tlenku azotu (39 ppm), metanu (5 ppm) i acetyleny (3 ppm) a także innych substancji możliwych do oznaczenia. Zawartość wymienionych substancji jest znacznie wyższa niż stwierdzona podczas spalania próbki podkładu z PE. Podkłady z PU podczas badania palności emitowały znacznie więcej pod względem różnorodności i zawartości szkodliwych dla zdrowia i środowiska substancji w gazach powstających podczas ich spalania niż miało to miejsce dla PE.



*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

Tabela 19. Właściwości termo kinetyczne próbek polietylenu.

	<i>Parametr</i>	<i>Jnostka</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Śr.</i>	<i>Odch. Stand</i>
<i>1</i>	<b>Strumień ciepła grzejnika</b>	$W/m^2$	50	0	50	<b>50</b>	-
<i>2</i>	<b>Czas zapłonu próbki (TTI)</b>	<i>s</i>	33	9	16	<b>26</b>	<b>9</b>
<i>3</i>	<b>Flameout – koniec palenia</b>	<i>s</i>	1119	81	704	<b>935</b>	<b>211</b>
<i>4</i>	<b>Całkowita ilość wydzielonego ciepła (THR)</b>	$kJ/m^2$	144,4	6,2	324,0	<b>101,5</b>	<b>67,3</b>
<i>5</i>	<b>Całkowita ilość wydzielonych dymów (TSR)</b>	$m^2/m^2$	1075,1	93,5	2678,4	<b>1215,7</b>	<b>334,4</b>
<i>6</i>	<b>Całkowite wytworzenie dymu - Total Smoke Production (TSP)</b>	$m^2$	44,9	8,3	23,7	<b>37,3</b>	<b>11,8</b>
<i>7</i>	<b>FIGRA = max.Peak HRR<sub>max</sub>/czas Peak HRR HRR<sub>max</sub></b>	$W/m^2s$	0,60	62	0,53	<b>0,58</b>	<b>0,05</b>
<i>8</i>	<b>Średnia szybkość wydzielania ciepła (HRR<sub>śr</sub>)</b>	$W/m^2$	41,86	0,46	426,23	<b>76,18</b>	<b>44,33</b>
<i>9</i>	<b>Największa szybkość wydzielania ciepła (HRR<sub>max</sub>)</b>	$W/m^2$	70,13	577,19	808,75	<b>52,02</b>	<b>35,78</b>
<i>10</i>	<b>Czas wydzielania HRR<sub>max</sub></b>	<i>s</i>	455	185	385	<b>342</b>	<b>140</b>
<i>11</i>	<b>Średnie efektywne ciepło spalania (HOC<sub>śr</sub>)</b>	$kJ/kg$	41,45	24	41,45	<b>1,71</b>	<b>0,46</b>
<i>12</i>	<b>Średnia powierzchnia właściwa zaciemnienia dymem (zadymienie SEA)</b>	$m^2/kg$	73,16	8,73	342,42	<b>129,77</b>	<b>75,65</b>

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

*Tabela 20. Uwalniane gazy podczas spalania próbek polietylenów.*

	<b>Gaz</b>	<b>Próbki 1</b>	<b>Próbki 2</b>	<b>Próbki 3</b>	<b>Średnia</b>	<b>Ich. Stand.</b>
1	<b>CO<sub>2</sub> [ppm]</b>	6500	7840	4353	6231	1759
2	<b>CO [ppm]</b>	158	132	80	123	40
3	<b>H<sub>2</sub>O [vol%]</b>	0,137	0,125	0,045	0,102	0,050
4	<b>HF [vppm]</b>	0	0	0	0,0	0,0
5	<b>HBr [vppm]</b>	0	0	0	0,0	0,0
6	<b>HCl [vppm]</b>	3	0,6	0,9	1,5	1,3
7	<b>HCN [vppm]</b>	0	0	0	0,0	0,0
8	<b>Formaldehyd [vppm]</b>	0	1,1	1,1	0,7	0,6
9	<b>Eten [vppm]</b>	2,3	1,7	2	2,0	0,3
10	<b>Propen [vppm]</b>	0	1,8	0	1	1
11	<b>Metan[vppm]</b>	3,2	1	1,6	1,9	1,1
12	<b>Akroleina [vppm]</b>	0	0	0	0,0	0,0
13	<b>Acetylen [vppm]</b>	2,7	0	0	0,9	1,6
14	<b>NO [vppm]</b>	0	0	0	0,0	0,0
15	<b>NO<sub>2</sub> [vppm]</b>	0	0	0	0	0
16	<b>NO<sub>x</sub> *[ppm]</b>	0	0	0	0	0
17	<b>SO<sub>2</sub> [vppm]</b>	0	0	0	0	0

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowooproczowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

Tabela 21. Właściwości termo kinetyczne próbek poliuretanu.

	<i>Parametr</i>	<i>Jnostka</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Śr.</i>	<i>Odch. Stand.</i>
<i>1</i>	<b>Strumień ciepła grzejnika</b>	$W/m^2$	50	0	50	<b>50</b>	-
<i>2</i>	<b>Czas zaplonu próbki (TTI)</b>	<i>s</i>	14	2	16	<b>14</b>	2
<i>3</i>	<b>Flameout – koniec palenia</b>	<i>s</i>	445	51	612	<b>469</b>	132
<i>4</i>	<b>Całkowita ilość wydzielonego ciepła (THR)</b>	$MJ/m^2$	65,9	3,4	86,9	<b>68,7</b>	16,9
<i>5</i>	<b>Całkowita ilość wydzielonych dymów (TSR)</b>	$m^3/m^2$	818,8	24,7	2302,9	<b>848,8</b>	439,9
<i>6</i>	<b>Całkowite wytworzenie dymu - Total Smoke Production (TSP)</b>	$m^3$	16,1	2,6	20,4	<b>16,4</b>	3,9
<i>7</i>	<b>FIGRA = max.Peak HRR<sub>max</sub>/czas Peak HRR HRR<sub>max</sub></b>	$W/m^2s$	<b>1,02</b>	<b>18</b>	<b>0,17</b>	<b>0,79</b>	0,54
<i>8</i>	<b>Średnia szybkość wydzielania ciepła (HRR<sub>śr</sub>)</b>	$W/m^2$	31,83	5,65	141,26	<b>32,91</b>	7,86
<i>9</i>	<b>Największa szybkość wydzielania ciepła (HRR<sub>max</sub>)</b>	$W/m^2$	79,67	223,36	235,07	<b>46,03</b>	29,71
<i>10</i>	<b>Czas wydzielania HRR<sub>max</sub></b>	<i>s</i>	275	190	40	<b>168</b>	119
<i>11</i>	<b>Średnie efektywne ciepło spalania (HOC<sub>śr</sub>)</b>	$MJ/kg$	21,50	5,53	21,57	<b>1,53</b>	0,04
<i>12</i>	<b>Średnia powierzchnia właściwa zaciemnienia dymem (zadymienie SEA)</b>	$m^2/kg$	91,96	0,64	570,64	<b>77,75</b>	12,31

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

*Tabela 22. Uwalniane gazy podczas spalania próbek poliuretanów.*

	<b>Gaz</b>	<b>Próbki 1</b>	<b>Próbki 2</b>	<b>Próbki 3</b>	<b>Średnia</b>	<b>dch. Stand.</b>
<b>1</b>	<b>CO<sub>2</sub> [ppm]</b>	4820	4262	2539	<b>3874</b>	<b>1189</b>
<b>2</b>	<b>CO [ppm]</b>	212	168	120	<b>167</b>	<b>46</b>
<b>3</b>	<b>H<sub>2</sub>O [vol%]</b>	0,119	0,113	0,094	<b>0,109</b>	<b>0,013</b>
<b>4</b>	<b>HF [vppm]</b>	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>5</b>	<b>HBr [vppm]</b>	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>6</b>	<b>HCl [vppm]</b>	3,3	1,4	1,9	<b>2,2</b>	<b>1,0</b>
<b>7</b>	<b>HCN [vppm]</b>	16,7	15,1	7,4	<b>13,1</b>	<b>5,0</b>
<b>8</b>	<b>Formaldehyd [vppm]</b>	1,2	1,1	1,1	<b>1,1</b>	<b>0,1</b>
<b>9</b>	<b>Eten [vppm]</b>	2,5	1,3	1,1	<b>1,6</b>	<b>0,8</b>
<b>10</b>	<b>Propen [vppm]</b>	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>11</b>	<b>Metan[vppm]</b>	7,6	4,9	1,8	<b>4,8</b>	<b>2,9</b>
<b>12</b>	<b>Akroleina [vppm]</b>	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>13</b>	<b>Acetylen [vppm]</b>	3,6	3,6	3,1	<b>3,4</b>	<b>0,3</b>
<b>14</b>	<b>NO [vppm]</b>	48,1	45,4	24,7	<b>39,4</b>	<b>12,8</b>
<b>15</b>	<b>NO<sub>2</sub> [vppm]</b>	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>16</b>	<b>NO<sub>x</sub>*[ppm]</b>	48	45	25	<b>39</b>	<b>13</b>
<b>17</b>	<b>SO<sub>2</sub> [vppm]</b>	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>

## 5.8. Wyniki analizy LCC

Jak wynika z przeprowadzonych analiz szacowanie korzyści długoterminowych można policzyć w wartościach bezwzględnych (przy pomijalnym koszcie kapitału), natomiast w analizie okresów, dla których da się wyznaczyć koszty kapitału (czyli np. do 12 lat), należy uwzględnić przejęcie przez państwo lub struktury / fundusze ponadpaństwowe części ciężaru inwestora, żeby alternatywa pomiędzy poszczególnymi rodzajami podkładów stała się realna. Analiza długoterminowa (z wyłączeniem zdyskontowanych przepływów pieniężnych -> 1.) pokazuje, że w okresie 150 lat skumulowane przepływy pieniężne mają najniższą wartość dla podkładów polietylenowych, jednakże trwała dominacja nad podkładami betonowymi (zastosowanie których daje drugi najniższy ujemny skumulowany przepływ pieniężny) następuje na 30 lat przed końcem okresu 150 letniego.

Pod kątem skumulowanego wyniku ekonomicznego (EBIT przedstawiony na Rysunku 64.) w okresie 30 lat, w którym koszt zakupu podkładów będzie prezentowany pod postacią amortyzacji również wygrywają podkłady polietylenowe, dając najniższy ujemny wynik.

Analiza wykonana dla przedsiębiorstwa Infra Silesia S.A. i DB Cargo Polska S.A wskazuje na ekonomiczną opłacalność w cyklu życia zastosowania innowacyjnych podkładów kolejowych wykonanych z polietylenu. Niestety barierą wejścia są koszty początkowe. Różnica w zakupie podkładów betonowych na 1km toru (495 tys. Zł) w stosunku do podkładów polietylenowych (1 427 tys. zł) jest wciąż znacząca. Jeśli w takim samym lub krótszym okresie analizowalibyśmy korzyści dla inwestora, który zdecydowałby się na zastosowanie podkładów polietylenowych, musiałoby to być oparte na okresie możliwości uzyskania dofinansowania części kosztów.

Innym motywatorem może być zmiana obowiązujących przepisów w takim kształcie, w którym oprócz zachęt do stosowania podkładów polietylenowych, pojawiłyby się naciski i ograniczenia w stosowaniu innych rodzajów podkładów (np. „kalendarz odchodzenia od podkładów drewnianych czy mineralnych).

## 5.9. Aspekty prawne

Po analizie przeprowadzonej w punkcie 4.10. spółka Infra Silesia S.A. dla linii kolejowych nr 211 i 211d składających się na odcinek Rybnik Towarowy- Bocznica

Kłokocin oraz na wybrane tory Bocznicy Kłokocin powinna opierać się na procedurze wprowadzenia do obrotu oraz dopuszczenia do eksploatacji podkładów polimerowych takich jak w przypadku ich wykorzystania na liniach kolejowych nieobjętych wymaganiami TSI oraz bocznicach kolejowych będących infrastrukturą prywatną, a także bocznicach niebędących infrastrukturą prywatną, dopuszczonych do eksploatacji przed 28.VII.2021 r. i które nie podlegają po tej dacie modernizacji lub odnowieniu, będzie opierała się o krajowe regulacje zawarte w szczególności w art. 22f u.t.k. i będzie polegała na konieczności otrzymania przez producenta podkładu polimerowego świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu (lub dla kolejnych egzemplarzy – deklaracji zgodności z typem), a następnie dopuszczenia do eksploatacji jako element podsystemu przez jego producenta. Schemat działań koniecznych do podjęcia przedstawiono na Rysunku 20.

## **6. WNIOSKI**

Jak już wskazano we wstępie podjęcie i realizacja tematu rozprawy doktorskiej znajduje uzasadnienie przede wszystkim w obszarze poznawczym użytkowania innowacyjnych podkładów kolejowych na infrastrukturze w Polsce.

Wyniki przeprowadzonych badań stanowią wzbogacenie bazy wiedzy niezbędnej w procesie remontów infrastruktury kolejowej w Polsce zarówno dla linii objętych TSI jak i dla linii nie objętych TSI.

Potwierdzono zasadność postawionej tezy, iż:

*Zasadnym jest stosowanie materiału polimerowego wykonanego z polietylenu do produkcji podkładów kolejowych z wykorzystaniem recyklingu, w odróżnieniu do materiału polimerowego wykonanego z poliuretanu.*

Pod kątem badanych właściwości materiałowych obu typów podkładów (polietylenowych i poliuretanowych) stwierdzono większą stabilność wytrzymałościową (zginanie i ściskanie) i plastyczną dla próbek wykonanych z polietylenu testowanych przed i po ekspozycji na zmienne warunki atmosferyczne w komorze klimatycznej. Próbki wykonane z poliuretanu cechują się mniejszą plastycznością i większą kruchością w porównaniu do próbek wykonanych z recyklingowanego polietylenu.

Stwierdzono zmianę właściwości materiału i makrostruktury dla podkładów poliuretanowych przed ekspozycją na zmienne warunki klimatyczne i po ekspozycji, wytrzymałość na zginanie dla podkładów z poliuretanu zmniejszyła się o 30% po ekspozycji w komorze klimatycznej. Powodem zmiany charakterystyki może być propagacja wody po włóknach szklanych zmniejszająca przyczepność na granicy faz osnowy i zbrojenia. Uniemożliwi to dalszą eksploatację podkładów poliuretanowych.

W oparciu o prawną analizę przedmiotu praca potwierdza możliwość zastosowania innowacyjnych polimerowych podkładów kolejowych na liniach zarządzanych przez firmę Infra Silesia S.A. Niniejsza dysertacja przedstawia ścieżkę zastosowania nowatorskich podkładów polimerowych na liniach kolejowych nie objętych TSI- czyli odpowiednia ścieżka dla linii zarządzanych przez spółkę Infra Silesia. Niniejsza praca przyczynia się do uporządkowania ścieżki prawnej związanej z wprowadzeniem do użytkowania nowoczesnych podkładów polimerowych w Polsce.

W oparciu o analizę ekonomiczną stwierdzono wysokie koszty początkowe nabycia podkładów polimerowych. Cena PE= 288% ceny podkładów betonowych a cena PU= 503%

ceny podkładu betonowego. Mimo niekorzystnego stosunku cen zakupu podkładów polimerowych, porównanie LCC dla 4 rodzajów podkładów wychodzi najkorzystniej dla podkładów wytworzonych z polietylenu.

Z uwagi na dużą różnicę w zakupie podkładów betonowych na 1km toru (495 tys. zł) w stosunku do podkładów polietylenowych (1 427 tys. zł) koniecznym wydaje się rozważyć aspekt dofinansowań przewidzianych z np. z budżetu Państwa, aby wywołać opłacalność ekonomiczną zastosowania podkładów polietylenowych przez Przedsiębiorców. Dofinansowanie wg niniejszej dysertacji powinno wynosić ok. 950 tys. zł do podkładów potrzebnych na 1km toru.

Zaobserwowano na zarejestrowanych krzywych DSC endotermię związanej z topnieniem PP, wynika to z zastosowania przez producenta podkładu materiału w postaci recyklatu polietylenowego, który był zanieczyszczony polipropylenem.

Uzasadniono, że korzystnym jest stosowanie podkładów polietylenowych pod kątem środowiskowym. W przypadku badania spalania wykazano, że podkłady polietylenowe spalając się wydzielają w dużej mierze dwutlenek węgla i śladowe ilości innych gazów. Podczas spalania PU wydzielili się rakotwórczy formaldehyd 1,1 ppm jak również silnie trujący cyjanowodór 13 ppm, zanotowano również wydzielenie metanu, acetylenu i tlenków azotu czego nie zanotowano przy spalaniu podkładów z polietylenowych.

W ujęciu środowiskowym już samo zastosowanie recyklatów jest korzystne dla ochrony środowiska naturalnego. Dodatkowo polimerowe podkłady kolejowe pozwalają na uniknięcie szkodliwych substancji stosowanych w impregnacji drewnianych podkładów kolejowych jak również zmniejsza konieczność pozyskiwania nieodnawialnych surowców energetycznych do produkcji podkładów drewnianych jak również betonowych. Dodatkowo polityka pro-środowiskowa jest kluczowa dla firmy DB Cargo Polska oraz Infra Silesia S.A.



## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] U. T. Kolejowego, *Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym*, Warszawa: Urząd Transportu Kolejowego, 2003.
- [2] P. P. L. Kolejowe, „Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru podkładów, podrozjazdnic i mostownic drewnianych – wymagania i badania Id-113,” PKP Polskie Linie Kolejowe, Warszawa, 19 listopad 2019.
- [3] M. Fabijański, Ł. Antolik i P. Kowalik, „ikolej.pl,” Instytut Kolejnictwa, Październik 2021. [Online]. Available: [http://www.ikolej.pl/fileadmin/user\\_upload/Seminaria\\_IK/pazdziernik\\_Antolik\\_pdf.pdf](http://www.ikolej.pl/fileadmin/user_upload/Seminaria_IK/pazdziernik_Antolik_pdf.pdf). [Data uzyskania dostępu: Marzec 2022].
- [4] S. Grulkowski, Z. Kędra, W. Koc i M. J. Nowakowski, *Drogi szynowe*, Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2003.
- [5] T. szynowy, „transportszynowy.pl,” [Online]. Available: <https://www.transportszynowy.pl/Kolej/torykolpodkladyrodz#betonowe>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [6] P. Polska, „Precon Polska,” [Online]. Available: <https://precon.com.pl/produkty/podklady-kolejowe-strunobetonowe/>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [7] T. Szynowy, „transportszynowy.pl,” [Online]. Available: <http://www.transportszynowy.pl/kolpodkladbl3d.jpg>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [8] Railwaygft, „railwaygft.pl,” Railwaygft, [Online]. Available: <http://www.railwaygft.pl/oferta/podklady/podklady-stalowe>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [9] Lankhorstrail, „lankhorstrail.com,” [Online]. Available: <https://www.lankhorstrail.com/en/plastic-sleepers>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [10] Sicut, „Sicut.co.uk,” [Online]. Available: <http://www.sicut.co.uk/product-portfolio/ecotrax-railway-sleepers/>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [11] H. Zobel, T. Al-Khafaji, M. Wróbel, P. Żółtkowski, B. Papis, P. Sulik, G. Kimbar i L. Dec, *Zastosowanie podkładów z kompozytów polimerowych w budownictwie infrastrukturalnym*, Kraków: SITK RP, 2017.
- [12] Sekisui-Rail, „sekisui-rail.com,” [Online]. Available: <https://www.sekisuirail.com/en/polski.html?file=files/content/Prospekte/Internatio>

- nal/Polnisch/Podklady%20syntetyczne%20z%20FFU%C2%AE.pdf. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [13] Tietekglobal, „Tietekglobal.com,” [Online]. Available: <https://tietekglobal.com/>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [14] Axionsi, „Axionsi.com,” [Online]. Available: <https://axionsi.com/>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [15] Integrigo, „Integrigo.com,” [Online]. Available: <https://www.integrigo.com/>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [16] A. M. A. K. O. K. Wahid Ferdous, „Geopolymer concrete-filled pultruded composite beams – Concrete mix design and application,” *Cement and Concrete Composites*, pp. 1-13, Kwiecień 2015.
- [17] Rubbergreen, „Rubbergreen.eu,” [Online]. Available: <https://www.rubbergreen.eu/railways>. [Data uzyskania dostępu: 2023 Marzec].
- [18] D. Haworth:, „ The Principles of Life - Cycle Costing,” *Industrial Forum*, pp. 13-20, 1975.
- [19] M. Biernacki, „Rachunek kosztów cyklu życia - ujęcie definicyjne i obszarowe.,” Wrocław, Uniwersytet we Wrocławiu, 2011, p. 37.
- [20] D. Woodward, „Life cycle costing – theory, information acquisition and application,” *International Journal of Project Management*, tom 15, nr 6, pp. 335-344.
- [21] G. Ś. (red), w *Informacja zarządcza w procesie formułowania i realizacji strategii firmy – wyzwanie dla polskich przedsiębiorstw*, Warszawa, Difin, 2003, p. 202.
- [22] R. J. K. A. Baussabaine, w *Whole Life-cycle Costing. Risk and Risk Responses*, Oxford, Blackwell Publishing Ltd., 2004, pp. 7-9.
- [23] R. Gmińska, R. Gmińska: Rachunek kosztów cyklu życia produktu jako narzędzie rachunkowości zarządczej., Wrocław: Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Nauki o Finansach, 2011.
- [24] *Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 23 listopada 2021 r. (Dz. U. 2021, poz. 2276)*.
- [25] d. i. B. G. d. i. M. S. i. i. Dr inż. A. Kristowski, „Model obliczania kosztu cyklu życia obiektu na przykładzie budynku mieszkalnego jednorodzinnego.,” w *Przegląd Budowlany*, Gdańsk, Politechnika Gdańska, 2021, p. 137.

- [26] A. Bogusz, „Koszty cyklu życia LCC,” [Online]. Available: [https://www.uzp.gov.pl/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0017/36107/Koszty\\_cyklu\\_zycia\\_LCC.pdf](https://www.uzp.gov.pl/__data/assets/pdf_file/0017/36107/Koszty_cyklu_zycia_LCC.pdf).
- [27] C. J. R. S. R. M. N. S. Thompson, „Life Cycle Cost and Assessment of Alternative Railway Sleeper Materials,” *Sustainability*, p. 2, 2022.
- [28] M. Ciszek, „Bezpieczeństwo ekologiczne – ważny czy żywotny interes narodowy? (perspektywa całościowa),” *Studia Ecologiae et Bioethicae*, pp. 13-26, Czerwiec 2017.
- [29] S. Śładkowski, *Bezpieczeństwo ekologiczne Rzeczypospolitej Polskiej*, Warszawa: AON, 204.
- [30] B. j. d. s. m. (. D. p. z. i. międzynarodowej., J. Haber, Warszawa, 1981.
- [31] W. Michajłow, „Problemy bezpieczeństwa ekologicznego świata i Polski. Międzynarodowe czynniki bezpieczeństwa Polski,” Warszawa, A. D. Rotfeld, 1986, p. 182.
- [32] AON, „Słownik terminów z zakresu bezpieczeństwa narodowego,” Warszawa, 2008, p. 16.
- [33] A. Wieloński, „Geografia przemysłu,” Warszawa, wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, 2005, p. 74.
- [34] M. K. H. Popiel, „Zagrożenia dla środowiska naturalnego w związku z prowadzeniem działalności gospodarczej,” *Wojskowa Akademia Techniczna*, 2020, p. 31.
- [35] D. Senczyk, w *Bezpieczeństwo ekologiczne a zrównoważony rozwój, wzajemne relacje*, Poznań, Wyższa Szkoła Bezpieczeństwa w Poznaniu, 2013, p. 67.
- [36] D. P. E. i. R. (. 2. z. d. 6. k. 2. r. w. s. o. u. p. d. w. z. ś. d. 2. r..
- [37] M. F. i. P. Regionalnej, „gov.pl,” Ministerstwo Funduszy i Polityki Regionalnej, [Online]. Available: <https://www.gov.pl/web/fundusze-regiony/raportowanie-spoeczne>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [38] M. Stawicka-Wałkowska, „Ocena wpływu budownictwa i przemysłu materiałów budowlanych na środowisko naturalne w świetle programu „Zrównoważony rozwój”,” *Prace Instytutu Techniki Budowlanej*, nr nr 2/3, p. 81.
- [39] D. S. K. L. V.-S. G. Wang, „Recykling i upcykling w praktyce odpadami gigantów budowlanych,” p. 1.

- [40] <https://sii.com.pl/podklady-kolejowe>, „<https://sii.com.pl/podklady-kolejowe>,” [Online]. Available: <https://sii.com.pl/podklady-kolejowe>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [41] *Załącznik do uchwały nr 106/2020 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 11 lutego 2020 s.7-8.*
- [42] Camex, „Raport zrównoważonego rozwoju Cemex Polska za rok 2021,” 2022. [Online]. Available: [https://www.cemex.pl/documents/46481509/46484615/Raport\\_Zrownowa%C5%BConego\\_Rozwoju\\_CEMEX\\_Polska\\_za\\_rok\\_2021\\_v2.pdf/](https://www.cemex.pl/documents/46481509/46484615/Raport_Zrownowa%C5%BConego_Rozwoju_CEMEX_Polska_za_rok_2021_v2.pdf/).
- [43] K. Europejska, „[ec.europa.eu](https://ec.europa.eu),” [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/management/docs/NEEI\\_Summary\\_PL.pdf](https://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/management/docs/NEEI_Summary_PL.pdf). [Data uzyskania dostępu: 2023 Marzec].
- [44] Y. J. P. S. S. D. J. Suhawn, „Mechanical Properties of Coal Ash Particle-Reinforced Recycled Plastic-Based Composites for Sustainable Railway Sleepers,” *Polymers*, nr 12, p. 2, 2020.
- [45] DB Cargo Polska, „<https://pl.dbcargo.com/>,” DB Cargo Polska, [Online]. Available: <https://pl.dbcargo.com/rail-pl-pl/metaNavi/zr%C3%B3wnowa%C5%BCony-rozw%C3%B3j/wymiar-ekonomiczny>. [Data uzyskania dostępu: Marzec 2023].
- [46] Z. Yao, H. J. Seong, Y. Jang, Environmental toxicity and decomposition of polyethylene, *Ecotoxicology and Environmental Safety* 242 (2022) 113933
- [47] Z. Yan, A. Zaoui \*, F. Zaïri, Uniaxial stretching and shape memory behavior of branched amorphous polyethylene, *Chinese Journal of Physics* 79 (2022) 6–12
- [48] I.I. Ahmed, A.M. Akintola, O.E. Afolabi, J.A. Adebisi, Recyclability of low-density polyethylene water sachet film into powder and its suitability for polyethylene-wood composite, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*
- [49] Trinet Yingsamphancharoen , Keeratikan Piriyakul, Feasibility study of steel reinforcement of polyethylene corrugated horizontal pipe for on-site underground water storage tanks and their applications, *Case Studies in Construction Materials* 17 (2022) e01578
- [50] S. Shetty, B. R. Pinkard, I. V. Novoseelov, Recycling of carbon fiber reinforced polymers in a subcritical acetic acid solution, *Heliyon* 8 (2022) e12242
- [51] S. Afgar and others, High strength insulating polymeric composite based on recycled/virgin polyethylene terephthalate (PET) reinforced with hydrous magnesium silicate (talc), *Journal of materials research and technology* 2022;21:3579-3593.
- [52] A. Dorigato, Recycling of polymer blends, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 4 (2021) 53-69

- [53] M. Y. Khalid, Z. U. Arif, W. Ahmed, H. Arshad, Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials
- [54] Nur Hazzarita Mohd Nasir, Fathoni Usman , Anis Saggaf , Saloma, Development of composite material from Recycled Polyethylene, Terephthalate and fly ash: Four decades progress review, *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* 5 (2022) 100280
- [55] M. Chanda, Chemical aspects of polymer recycling, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 4 (2021) 133-150
- [56] N. Rhayma and others, Reliability analysis of maintenance operations for railway tracks, *Reliability Engineering and System Safety* 114 (2013) 12-25
- [57] A. Alabi, and others, Bassej Okon Samuel, Muhammad Uhuotu Suleiman, Powder production from recycled low-density polyethylene waste and doum palm nuts for light weight engineering application: A circular economy approach, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 5 (2022) 49e59
- [58] P. J. Lemstra, Chapter 1: High-performance polyethylene fibers, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 5 (2022) 49-59
- [59] M. Koga , and others , Accelerated aging-induced variation of polypropylene (PP) structure studied by two-dimensional (2D) small-angle X-ray scattering (SAXS) correlation spectroscopy, *Journal of Molecular Structure* 1207 (2020) 127764
- [60] C. Wu , and others, High-quality cutting of polypropylene (PP) film by UV nanosecond laser based on thermal ablation, *Optics & Laser Technology* 147 (2022) 107600
- [61] P. Gijnsman, Rudinei Fiorio, Long term thermo-oxidative degradation and stabilization of polypropylene (PP) and the implications for its recyclability, *Polymer Degradation and Stability* 208 (2023) 110260
- [62] A. Rüppel , and others, Adhesion of liquid silicone rubber (LSR) polypropylene (PP) composites after storage tests, *Polymer Testing* 114 (2022) 107702
- [63] M. Shirinbayan, and others, Multi-scale analysis of mechanical properties and damage behavior of polypropylene composite (GF50-PP) plate at room and cryogenic temperatures, *Composite Structures* 278 (2021) 114713
- [64] F. Sciarretta, and others, Ultra-High performance concrete (UHPC) with polypropylene (Pp) and steel Fibres: Investigation on the high temperature behaviour, *Construction and Building Materials* 304 (2021) 124608
- [65] D.S. Morais, J. Cruz, R. Fangueiro, H. Lopes, R.M. Guedes, M.A. Lopes, Mechanical behavior of ropes based on polypropylene (PP) and poly (ethylene

- terephthalate) (PET) multifilament yarns for Achilles tendon partial substitution, journal of the mechanical behavior of biomedical materials 106 (2020) 103734.
- [66] W. Wang, and others, Effects of gamma radiation on the impact strength of polypropylene (PP)/ high density polyethylene (HDPE) blends, Results in Physics 12 (2019) 2169–2174
- [67] A. Alsabri, F. Tahir, S. G. Al-Ghamdi, Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region, Materials Today: Proceedings 56 (2022) 2245–2251
- [68] D. Palma-Ramírez, and others, An assembly strategy of polylactic acid (PLA)-SiO<sub>2</sub> nanocomposites embedded in polypropylene (PP) matrix, journal of materials research and technology 2021 ; 14 : 2150-2164
- [69] W. Huang and others, Digital light 3D printing of a polymer composite featuring robustness, self-healing, recyclability and tailorable mechanical properties, Additive Manufacturing 61 (2023) 103343
- [70] C. Teng and others, Fast space charge packet characteristics within low-density polyethylene affected by epitaxial crystallization, Energy Reports 8 (2022) 533-540
- [71] A. S. Hameed, Suitability of rubber concrete for railways sleepers, Perspectives in Science (2016) 8, 32—35
- [72] A. Ghorbani, Polymeric composite railway sleepers, Uluslar arası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13), 9-11 Ekim 2013
- [73] A. Manalo, T. Aravinthan, W. Karunasena, A. Ticoalu, A review of alternative materials for replacing timber sleepers, Composite Structure 92 (2010) 603-611
- [74] Norma branżowa BN-71/9313-08, Nawierzchnia kolejowa, Materiały drzewne nawierzchni kolejowej nasycone olejem
- [75] V. Gecevska, Z. Anisic, T. Stojanova, Lean Product Lifecycle Management Approach, International Journal of Industrial Engineering and Management, 2013
- [76] T. J. Nosker, A. Tewatia, Development, testing and application of recycled plastic composite sleepers, ResearchGate
- [77] Ł. Wierzbicki, J. Ćwiek, K. Labisz, J. Konieczny, J. Młyńczak, S. Surma, Possibilities of use polymeric materials for railway sleepers, IX International Conference, Transport Problems
- [78] W. Ferdous, Composite railway sleepers: new developments and opportunities, Researchgate, Composite Structures 134:158-168, 2015

## **SPIS RYSUNKÓW**

Rysunek 1. Tor kolejowy zbudowany na podkładach drewnianych .....	15
Rysunek 2 Rodzaje podkładów drewnianych w Polsce [2].....	16
Rysunek 3. Cylinder impregnacyjny [3].....	17
Rysunek 4. Podkłady betonowe: a) podkład dwublokowy, b) podkład monoblokowy [4].....	19
Rysunek 5. Przykładowy tor na podkładach żelbetowych [5].....	20
Rysunek 6. Przykładowy tor na podkładach strunobetonowe [6].....	20
Rysunek 7. Podrozdajdnica strunobetonowa SP93. 1- beton, 2 – wiązka zbrojenia, 3- dybel polietylenowy, 4- strzeżono, długość L=2,2-4,9 m, rozkład i rozstaw dybli zależny od typu rozjazdu i podrozdajdnicy [5].....	21
Rysunek 8. Podkład betonowy powlekany od spodu warstwą plastycznie odkształcalną [7] .....	22
Rysunek 9. Przykład toru na podkładach stalowych.....	23
Rysunek 10. Podkład stalowy typu Ypsilon [5].....	24
Rysunek 11. Tor kolejowy na podkładach polimerowych KLP Lankhorst [9] .....	26
Rysunek 12. Przygotowane podkłady polimerowe firmy Sicut pod budowę toru [10] .....	27
Rysunek 13. Przykładowy podkład polimerowy firmy Sicut [10] .....	27
Rysunek 14. Podkłady polietylenowe [9] .....	28
Rysunek 15. Przekrój podkładu polietylenowego- blokowego [9] .....	29
Rysunek 16. Podkłady kompozytowe w rozjazdach i skrzyżowaniach.....	30
Rysunek 17. Schemat produkcji podkładów metodą poltruzji [11].....	31
Rysunek 18. Podkład kolejowy FFU z firmy Sekisui[12] .....	33
Rysunek 19. Schemat dopuszczenia podkładu innowacyjnego do eksploatacji .....	50
Rysunek 20. Schemat dopuszczenia podkładu innowacyjnego do eksploatacji .....	53
Rysunek 21. Schematyczny opis procesu zezwolenia na dopuszczenie do eksploatacji. ....	56
Rysunek 22. Schematyczne przedstawienie analizowanych aspektów na potrzeby Przedsiębiorstwa. ....	59
Rysunek 23. Schemat kolejności wykonywania badań .....	59
Rysunek 24. Oznaczenia próbek z przekroju poprzecznego podkładu polietylenowego .....	64
Rysunek 25. Zestawienie a) próbek z podkładu polietylenowego: brzegu oraz b) rdzenia do badania ściskania, a także c) schemat przedstawiający wymiary próbek.....	65
Rysunek 26. Próbką z a) podkładu poliuretanowego do badania ściskania, b) schemat przedstawiający wymiar próbek c) schematyczny rysunek przedstawiający miejsce pobrania próbek na przekroju poprzecznym podkładu.....	65
Rysunek 27. Wymiary próbek używanych do badania temperatury ugięcia HDT .....	68
Rysunek 28. Maszyna do badań temp. ugięcia pod obciążeniem HDT Instron HV3S .....	68
Rysunek 29. Maszyna wytrzymałościowa LabTest 6.100 I klasy dokładności: a) widok ogólny, b) widok głowicy ściskającej.....	70
Rysunek 30. Ściskane próbki polietylenowe brzegowe (PE B) przed komorą- ujęcie z lotu ptaka. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5 .....	70
Rysunek 31. Ściskane próbki polietylenowe brzegowe (PE B) przed komorą. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5 .....	70
Rysunek 32. Ściskane próbki polietylenowe rdzenia (PE R) przed komorą. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5 .....	71
Rysunek 33. Ściskane próbki polietylenowe B po komorze klimatycznej. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5 .....	71
Rysunek 34. Ściskane próbki polietylenowe R po komorze klimatycznej. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5 .....	71
Rysunek 35. Ściskane próbki poliuretanowe przed komorą klimatyczną. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5 .....	72
Rysunek 36. Ściskane próbki poliuretanowe po komorze klimatycznej. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5 .....	72
Rysunek 37. Porównanie próbek PE (rdzeń), a) przed komorą, b) po komorze .....	73
Rysunek 38. Porównanie próbek PE (brzeg), a) przed komorą, b) po komorze .....	73

*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowo opracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

Rysunek 39. Porównanie próbek PU, a) przed komorą, b) po komorze .....	73
Rysunek 40. Maszyna wytrzymałościowa model LabTEST 6.100, a) po lewej widok z ekstensometrem, b) po prawej widok zgłębnika .....	74
Rysunek 41. Zginane próbki PE przed komorą. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5 .....	75
Rysunek 42. Zginane próbki PE po komorze. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5 .....	76
Rysunek 43. Zginane próbki PU przed komorą. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, .....	77
Rysunek 44. Zginane próbki PU po komorze. a) próbka nr 1, b) próbka nr 2, c) próbka nr 3, d) próbka nr 4, e) próbka nr 5 .....	78
Rysunek 45. Próbka PE przed komorą podczas badania zginania .....	78
Rysunek 46. Próbka PE po komorze podczas badania zginania .....	78
Rysunek 47. Próbka PU przed komorą podczas badania zginania .....	79
Rysunek 48. Próbka PU po komorze podczas badania zginania .....	79
Rysunek 49. Komora klimatyczna ATT Discovery CS640 .....	81
Rysunek 50. Różnicowy kalorymetr skaningowy DSC 882e .....	83
Rysunek 51. Miejsce na próbki badawcze w różnicowym kalorymetrze skaningowym .....	84
Rysunek 52. Pojemniczek na próbkę badawczą .....	84
Rysunek 53. Spreparowana próbka badawcza .....	84
Rysunek 54. Proces szczelnego zamknięcia spreparowanej próbki badawczej w pojemniku badawczym .....	84
Rysunek 55. Umiejscowione dwa pojemniki badawcze- jeden z próbką badawczą a drugi wzorcowy- pusty .....	84
Rysunek 56. Sprzęt DMA 861e firmy Mettler-Toled, a) po lewe całe urządzenie, b) po prawej przybliżenie na miejsce usytuowania próbki .....	86
Rysunek 57. Kalorymetr stożkowy firmy Fire Testing Technology,, a) urządzenie bez próbki, b) urządzenie z próbką .....	87
Rysunek 58. Próbka podkładu polietylenowego przygotowana do badania palności .....	88
Rysunek 59. Próbka podkładu polietylenowego podczas badania palności .....	88
Rysunek 60. Próbka podkładu poliuretanowego przygotowana do badania palności .....	88
Rysunek 61. Próbka podkładu poliuretanowego podczas badania palności .....	88
Rysunek 62. Schemat czasookresów wymiany podkładów dla różnych typów podkładów .....	90
Rysunek 63. Wykres zmiany kosztów LCC dla 1km toru na przestrzeni lat dla 4 różnych typów podkładów kolejowych .....	93
Rysunek 64. Skumulowane przepływy pieniężne obrazujące koszty cyklu życia 4 produktów w ujęciu 150letnim .....	94
Rysunek 65. Koszty cyklu życia 4 analizowanych produktów w ujęciu 30letnim .....	95
Rysunek 66. Próbka podkładu poliuretanowego przygotowana do badania temperatury ugięcia HDT przed zanurzeniem w medium grzewczym .....	102
Rysunek 67. Wykres badania ściskania próbek PE R przed ekspozycją w komorze klimatycznej .....	104
Rysunek 68. Wykres badania ściskania próbek PE R po ekspozycji w komorze klimatycznej .....	104
Rysunek 69. Wykres badania ściskania próbek PE B przed ekspozycją w komorze klimatycznej .....	105
Rysunek 70. Wykres badania ściskania próbek PE R po ekspozycji w komorze klimatycznej .....	105
Rysunek 71. Wykres badania ściskania próbek PU przed ekspozycją w komorze klimatycznej .....	106
Rysunek 72. Wykres badania ściskania próbek PU po ekspozycji w komorze klimatycznej .....	106
Rysunek 73. Wykres zginania próbek polietylenowych przed ekspozycją w komorze klimatycznej .....	109
Rysunek 74. Wykres zginania próbek polietylenowych po ekspozycji w komorze klimatycznej .....	109
Rysunek 75. Wykres zginania próbek poliuretanowych przed ekspozycją w komorze klimatycznej .....	110
Rysunek 76. Wykres zginania próbek poliuretanowych po ekspozycji w komorze klimatycznej .....	110
Rysunek 77. Blok podkładu polietylenowego po ekspozycji w komorze klimatycznej .....	111
Rysunek 78. Blok podkładu poliuretanowego po ekspozycji w komorze klimatycznej .....	112
Rysunek 79. Zestawienie wykresów pierwszego grzania próbek PE przed i po komorze .....	114
Rysunek 80. Zestawienie wykresów chłodzenia próbek PE przed i po komorze .....	114
Rysunek 81. Zestawienie wykresów drugiego grzania próbek PE przed i po komorze .....	114



*Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych  
dla nowoopracowanych polimerowych podkładów kolejowych w oparciu o LCC*

<i>Rysunek 82. Zestawienie wykresów pierwszego grzania próbek PU przed i po komorze.....</i>	<i>115</i>
<i>Rysunek 83. Zestawienie wykresów chłodzenia próbek PE przed i po komorze .....</i>	<i>115</i>
<i>Rysunek 84. Zestawienie wykresów drugiego grzania próbek PE przed i po komorze .....</i>	<i>115</i>
<i>Rysunek 85. Wykres DMA próbki podkładu PE przed komorą.....</i>	<i>116</i>
<i>Rysunek 86. Wykres badania DMA próbki podkładu PE po komorze .....</i>	<i>117</i>
<i>Rysunek 87. Wykres badania DMA próbki podkładu PU przed komorą .....</i>	<i>118</i>
<i>Rysunek 88. Wykres badania DMA próbki podkładu PU po komorze .....</i>	<i>118</i>
<i>Rysunek 89. Wykres spalania próbki podkładu z materiału polietylenowego PE.....</i>	<i>119</i>
<i>Rysunek 90. Wykres spalania próbki podkładu z materiału poliuretanowego PU .....</i>	<i>119</i>

## **SPIS TABEL**

<i>Tabela 1. Wymiary podkładów drewnianych produkowanych i stosowanych w Polsce [2] .....</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 2. Własności gatunków stosowanych do produkcji podkładów w Polsce [2] .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabela 3. Właściwości podkładów z drewna i kompozytów [12] .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 4. Wybrane koszty życia produktu z perspektywy producenta .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 5. Zestawienie analizowanych podkładów i czasookresu ich wymiany .....</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 6. Zestawienie kosztów montażu .....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 7. Koszty wymian produktu w analizie 150letniej dla 1km toru .....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 8. Zestawienie kosztów utylizacji dla 4 rodzajów podkładów kolejowych na 150 lat dla 1km toru ....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 9. Zestawienie LCC dla 4 rodzajów podkładów kolejowych na 150lat dla 1km toru .....</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 10. Przedstawienie LCC różnych podkładów na 1km toru w czasookresach od 50-200 lat .....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 11. Spis torów bocznicy Kłokocin przeznaczonych pod wymianę podkładów .....</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 12. Koszty wymiany podkładów na odcinku Rybnik Towarowy- Bocznicza Kłokocin .....</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 13. Koszty cyklu życia podkładów na 150 lat na odcinku Rybnik Towarowy- Bocznicza Kłokocin.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 14. Koszty cyklu życia podkładów na 35 lat na odcinku Rybnik Towarowy- Bocznicza Kłokocin.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 15. Koszty wymiany podkładów na odcinku Rybnik Towarowy- Bocznicza Kłokocin .....</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 16. Koszty cyklu życia podkładów dla 150 lat dla wybranych torów boczniczy Kłokocin .....</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 17. Koszty cyklu życia podkładów na 35 lat na wybranych torach boczniczy Kłokocin .....</i>	<i>99</i>
<i>Tabela 18. Wyniki badania temperatury ugięcia pod obciążeniem HDT .....</i>	<i>102</i>
<i>Tabela 19. Właściwości termo kinetyczne próbek polietylenu. ....</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 20. Uwalniane gazy podczas spalania próbek polietylenów.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 21. Właściwości termo kinetyczne próbek poliuretanu. ....</i>	<i>123</i>
<i>Tabela 22. Uwalniane gazy podczas spalania próbek poliuretanów. ....</i>	<i>124</i>