

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Rafał Baron

**Analiza śladu węglowego produkcji magnesów
neodymowych do generatorów turbin wiatrowych z
uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego**

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Marcin Lutyński

Opiekun pomocniczy:

Dr inż. Piotr Matusiak

Szkoła Doktorów Politechniki Śląskiej

Podziękowania

Z głębokim poczuciem wdzięczności pragnę podziękować wszystkim osobom, które swoim wsparciem, radą i zaangażowaniem przyczyniły się do powstania niniejszej rozprawy doktorskiej.

*Na szczególne wyrazy uznania zasługuje mój Promotor, **prof. dr hab. inż. Marcin Lutyński**, którego ogromna wiedza, merytoryczne wskazówki, życzliwość i cierpliwość towarzyszyły mi na każdym etapie pracy. Dziękuję za ukierunkowanie moich działań badawczych, pomoc w kształtowaniu koncepcji rozprawy, a także za nieocenione wsparcie i motywację w momentach szczególnie wymagających.*

*Wyrazy szczerzej wdzięczności kieruję również do mojego Opiekuna Pomocniczego, **dr. inż. Piotra Matusiaka**, za cenne uwagi, inspirujące dyskusje, merytoryczne wsparcie przy realizacji analiz i obliczeń, a także za wnikliwe spojrzenie na ostateczny kształt pracy.*

Pragnę także podziękować wszystkim Pracownikom Politechniki Śląskiej oraz ITG KOMAG, którzy służyli pomocą merytoryczną, udostępniali niezbędne zasoby i dzielili się swoim doświadczeniem, umożliwiając sprawną realizację badań.

Na szczególne wyróżnienie zasługują osoby, które swoją życzliwością i zaangażowaniem wspierały mnie w codziennej pracy badawczej oraz w chwilach wymagających dodatkowej determinacji.

*Na koniec pragnę z całego serca podziękować mojej Żonie, **Annie**, za nieustające wsparcie, cierpliwość, wyrozumiałość i wiarę we mnie. Jej obecność i motywacja były dla mnie niewyczerpanym źródłem siły w dążeniu do celu.*

Streszczenie

Praca pt. „Analiza śladu węglowego produkcji magnesów neodymowych do generatorów turbin wiatrowych z uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego” doprowadziła do opracowania metodyki wyznaczania śladu węglowego dla pełnego cyklu życia generatora turbiny wiatrowej oraz wskazania sposobów jego redukcji poprzez zastosowanie procesów recyklingu. Głównym motywem podjęcia badań była rosnąca potrzeba opracowania efektywnych metod zagospodarowania odpadów powstających w sektorze energetyki wiatrowej, wynikająca z kończącej się żywotności turbin i konieczności wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym.

Struktura rozprawy obejmuje część teoretyczną i badawczą. Praca składa się ze wstępu, dziewięciu rozdziałów, wniosków, bibliografii, spisów tabel i rysunków oraz załączników. W części wstępnej sformułowano cel naukowy i użytkowy pracy, postawiono tezę oraz określono zakres badań. Część literaturowa obejmuje przegląd zagadnień dotyczących energetyki wiatrowej, konstrukcji turbin i mikroinstalacji wiatrowych, problematyki recyklingu turbin, procesów wytwarzania magnesów neodymowych oraz metod wyznaczania śladu węglowego.

W części badawczej przeanalizowano przydomowy generator synchroniczny PMzg132-8B, typowo stosowany w małych turbinach wiatrowych. Opracowano metodykę jego demontażu, przeprowadzono szczegółową analizę materiałową, wyodrębniając dziewięć głównych grup materiałowych, oraz wykonano badania identyfikacyjne z użyciem spektroskopii FTIR. Z wykorzystaniem techniki ICP-MS określono udział surowców krytycznych i strategicznych, w tym pierwiastków ziem rzadkich w magnesach NdFeB, i przeprowadzono dla nich ocenę ryzyka związanego z ich dostępnością, wskaźników recyklingu i możliwości zastępowania.

Dla każdego etapu cyklu życia generatora, począwszy od pozyskania surowców, przez produkcję, transport, eksploatację, po demontaż – obliczono wartość śladu węglowego z wykorzystaniem dedykowanych do tego celu baz oraz oprogramowania. Całkowity ślad węglowy wyniósł 496,08 kg CO₂ eq, z czego największy udział miała produkcja magnesów neodymowych. W ramach analizy wrażliwości zbadano wpływ różnych scenariuszy transportu magnesów na poziom emisji.

Przeanalizowano również scenariusze recyklingu poszczególnych grup materiałowych, w tym autorską metodę separacji elektrostatycznej mieszaniny miedzi i tworzywa, porównując emisje z procesów recyklingu z produkcją surowców pierwotnych. W każdym przypadku recykling przyczynił się do istotnej redukcji śladu węglowego, a dla magnesów neodymowych redukcja sięgała 87,03%.

Łączna wartość uzyskanej redukcji wartości śladu węglowego dla pełnego cyklu życia generatora wynosi 213,29 kg CO₂ eq. Porównując uzyskany wynik do wartości śladu węglowego związanej z produkcją elementów z surowca pierwotnego (496,08 kg CO₂ eq), uzyskano redukcję o 43,06 %.

Wnioski z badań jednoznacznie potwierdzają, że zastosowanie recyklingu magnesów neodymowych i surowców strategicznych w generatorach turbin wiatrowych, zgodnie z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym, pozwala znacząco zmniejszyć ślad węglowy, ograniczyć zużycie zasobów naturalnych oraz zmniejszyć zależność od niestabilnych

łańcuchów dostaw. Wyniki badań wdrożono w ITG KOMAG, umożliwiając praktyczne zastosowanie opracowanych metod w przemyśle.

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa, magnesy neodymowe, ślad węglowy, recykling, gospodarka o obiegu zamkniętym, surowce krytyczne, LCA.

Summary

The dissertation entitled “Carbon Footprint Analysis of Neodymium Magnet Production for Wind Turbine Generators Considering the Principles of Circular Economy” led to the development of a methodology for determining the carbon footprint over the full life cycle of a wind turbine generator, as well as identifying ways to reduce it through the application of recycling processes. The main motivation behind undertaking the research was the growing need to develop effective methods for managing waste generated in the wind energy sector, resulting from the end-of-life phase of turbines and the necessity of implementing circular economy principles.

The structure of the dissertation includes both theoretical and research parts. The work consists of an introduction, nine chapters, conclusions, bibliography, lists of tables and figures, and appendices.

In the introductory section, the scientific and utilitarian objectives of the work were formulated, a thesis was stated, and the scope of research was defined. The literature review covers issues related to wind energy, the design of turbines and micro wind installations, the challenges of turbine recycling, neodymium magnet production processes, and methods of determining the carbon footprint.

In the research section, a PMzg132-8B household synchronous generator, typically used in small wind turbines, was analysed. A methodology for its disassembly was developed, a detailed material analysis was carried out, distinguishing nine main material groups, and identification tests were performed using FTIR spectroscopy. Using ICP-MS, the share of critical and strategic raw materials, including rare earth elements in NdFeB magnets, was determined, and a risk assessment was conducted regarding their availability, recycling indicators, and substitution potential.

For each stage of the generator’s life cycle – from raw material acquisition, through production, transport, operation, to disassembly – the carbon footprint value was calculated using dedicated databases and software. The total carbon footprint amounted to 496,08 kg CO₂ eq, with the largest share attributed to neodymium magnet production. As part of a sensitivity analysis, the impact of different magnet transport scenarios on emission levels was examined.

Recycling scenarios for individual material groups were also analysed, including an original method of electrostatic separation of a copper–plastic mixture, comparing emissions from recycling processes with those from primary raw material production. In every case, recycling contributed to a significant reduction in the carbon footprint, and for neodymium magnets the reduction reached 87,03%.

The total achieved reduction in carbon footprint for the full life cycle of the generator amounted to 213,29 kg CO₂ eq. Comparing this result to the carbon footprint value associated

with producing components from primary raw materials (496,08 kg CO₂ eq), a reduction of 43,06% was achieved.

The research findings clearly confirm that the application of recycling of neodymium magnets and strategic raw materials in wind turbine generators, in line with circular economy principles, allows for a significant reduction of the carbon footprint, limits the consumption of natural resources, and decreases dependency on unstable supply chains. The research results were implemented at ITG KOMAG, enabling the practical application of the developed methods in industry.

Keywords: wind turbine, neodymium magnets, carbon footprint, recycling, circular economy, critical raw materials, LCA.

Spis treści

Streszczenie	3
Summary	4
Wstęp.....	8
I. Cel, teza i zakres pracy	9
II. Część literaturowa	11
1. Energetyka wiatrowa w Polsce.....	11
1.1. Turbina wiatrowa – konstrukcja, zasada działania	12
1.2. Zalety i wady energetyki wiatrowej.....	16
1.3. Mikroinstalacje wiatrowe w Polsce	17
1.4. Recykling turbin wiatrowych.....	18
2. Produkcja i recykling magnezów neodymowych	24
2.1. Wytwarzanie magnezów Nd – Fe – B metodą metalurgii proszków	25
2.2. Wytwarzanie magnezów Nd – Fe – B metodą szybkiego chłodzenia ze stanu ciekłego	27
2.3. Recykling magnezów neodymowych.....	27
2.4. Szacunkowe perspektywy popytu oraz podaży REE wykorzystywanych do produkcji magnezów neodymowych	31
2.5. Wpływ recyklingu magnezów NdFeB na środowisko naturalne	33
3. Metody wyznaczania śladu węglowego	34
3.1. Normy prawne związane z poruszaną tematyką	34
3.2. Ślad węglowy.....	37
3.2.1. Publicly Available Specification 2050	38
3.2.2. Standard ISO 14067.....	38
3.2.3. Greenhouse Gas Protocol	38
3.2.4. Ślad węglowy w branży wydobywczej.....	39
III. Część badawcza.....	40
4. Ocena cyklu życia generatora.....	40
4.1. Określenie celu i zakresu	41
4.2. Dane wejściowe i wyjściowe	44
4.3. Ocena wpływu cyklu życia	47
4.4. Interpretacja wyników.....	47
5. Metodyka demontażu turbin wiatrowych	48
5.1. Cięcie i separacja	50
5.2. Załadunek i transport	51
6. Demontaż generatora turbiny wiatrowej	52
6.1. Badania strukturalne wybranych elementów generatora	56
6.2. Uzyskane materiały i ich rozkład masowy.....	59
6.3. Surowce strategiczne w generatorze	61
6.4. Ocena ryzyka utraty dostaw oraz stopień zastępowalności	63

7.	Metodologia wyznaczania wartości śladu węglowego.....	65
8.	Obliczanie wartości śladu węglowego cyklu życia generatora	68
8.1.	Charakterystyka danych.....	68
8.2.	Wyniki obliczeń wartości śladu węglowego na poszczególnych etapach cyklu życia	75
8.3.	Wyniki obliczeń wartości śladu węglowego w całym cyklu życia generatora	83
8.4.	Analiza wrażliwości	87
9.	Recykling generatora.....	97
9.1.	Unieszkodliwianie wszystkich elementów na składowisku odpadów	97
9.2.	Częściowy recykling materiałów wchodzących w skład generatora	99
9.2.1.	Recykling elementów stalowych	101
9.2.2.	Recykling elementów aluminiowych	106
9.2.3.	Recykling tworzyw sztucznych	110
9.2.4.	Recykling miedzi	114
9.2.5.	Recykling papieru.....	118
9.3.	Ponowne użycie zdemontowanych magnesów neodymowych.....	122
9.4.	Recykling magnesów neodymowych.....	127
9.4.1.	Odzysk pierwiastków ziem rzadkich (REE) z magnesów neodymowych.....	127
9.4.2.	Odzysk wszystkich surowców z magnesów neodymowych.....	131
9.5.	Kompleksowy recykling wszystkich podzespołów generatora.....	135
9.5.1.	Wyniki uzyskanych redukcji wartości śladu węglowego dla dotychczas analizowanych grup materiałowych.....	135
9.5.2.	Recykling pozostałych grup materiałowych.....	137
9.6.	Uzyskane efekty wynikające z recyklingu generatora	150
9.7.	Przełożenie obliczeń wpływu środowiskowego przydomowego generatora turbiny wiatrowej na skalę przemysłową.....	152
IV.	Wnioski	155
	Literatura:	160
	Wykaz wybranych oznaczeń i skrótów	167
	Wybrane oznaczenia.....	167
	Wybrane skróty	167
	Spis tabel:	168
	Spis rysunków:	169
	Załączniki:	171

Wstęp

Transformacja energetyczna, zmierzająca ku odejściu od gospodarki opartej na węglu na rzecz gospodarki niskoemisyjnej, przyczynia się do coraz szerszego zastosowania odnawialnych źródeł energii (OZE). W 2024 roku w Polsce odnotowano rekordowy udział OZE w miksie energetycznym, wynoszący 29,6%. Wśród nich szczególne znaczenie miały turbiny wiatrowe, których udział wyniósł 14,7% [1]. Pomimo stosunkowo młodego wieku polskich farm wiatrowych, w przyszłości pojawi się problem recyklingu elementów turbin wiatrowych, których żywotność wynosi około 20-25 lat. Szacuje się, że do końca 2023 roku na świecie wycofanych zostało około 14 000 turbin, co wiąże się z koniecznością przetworzenia 40 000 – 60 000 ton materiałów [2].

Ze względu systematyczne wycofywanie turbin wiatrowych m.in. ze względu na zmieniające się technologie oraz wprowadzanie turbin o wyższej sprawności, rośnie zapotrzebowanie na opracowanie efektywnych metod recyklingu. Obecnie około 80% masy podzespołów turbin wiatrowych jest poddawane recyklingowi są to głównie stalowe elementy konstrukcyjne, gondole i wieże. Jednak procesy związane z recyklingiem są kosztowne i energochłonne, co skłania do poszukiwania rozwiązań zmniejszających ich koszty i wpływ środowiskowy, zwłaszcza w kontekście redukcji śladu węglowego [3].

Celem niniejszej pracy jest analiza śladu węglowego w cyklu życia generatorów turbin wiatrowych wyposażonych w magnesy neodymowe, z uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego (GOZ). Proces recyklingu tych urządzeń, w szczególności odzysk surowców krytycznych, takich jak pierwiastki ziem rzadkich, ma kluczowe znaczenie nie tylko dla redukcji śladu węglowego, ale także w kontekście strategicznych zasobów Unii Europejskiej. W 2023 roku Komisja Europejska opublikowała uaktualnioną listę surowców krytycznych, podkreślając ich znaczenie dla nowoczesnych technologii i gospodarki. Magnesy trwałe NdFeB, wykorzystywane w generatorach turbin wiatrowych, zawierają surowce krytyczne czyniąc proces ich odzysku i ponownego wykorzystania jednym z priorytetów badań.

Niniejsza praca odpowiada na wyzwania związane z wycofywaniem turbin wiatrowych z eksploatacji, uwzględniając aspekty środowiskowe i gospodarcze. Opracowana metodyka wyznaczania śladu węglowego dla generatorów wiatrowych, oparta na ocenie cyklu życia (LCA), ma na celu wskazanie, w jaki sposób recykling tych urządzeń może zmniejszyć ich oddziaływanie na środowisko. Analizy obejmują również różne scenariusze transportu oraz wpływu wykorzystania surowców pierwotnych i wtórnych. Praca przyczyni się do opracowania wytycznych, które pomogą w zarządzaniu odpadami z przemysłu energetycznego oraz wspiera rozwój niskoemisyjnej gospodarki opartej na odnawialnych źródłach energii.

Niniejsza praca ma charakter wdrożeniowy. Założone w niej wytyczne dotyczące ograniczenia śladu węglowego, wynikające z opracowanych metod recyklingu oraz odzysku surowców krytycznych, zostaną wdrożone w zakładzie BG Instytutu Techniki Górniczej KOMAG. Wdrożenie to pozwoli na praktyczne zastosowanie wyników badań oraz optymalizację procesów związanych z recyklingiem generatorów turbin wiatrowych.

I. Cel, teza i zakres pracy

Celem naukowym niniejszej pracy jest wyznaczenie śladu węglowego w cyklu życia generatora turbiny wiatrowej z uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego.

Celem utylitarnym pracy jest opracowanie oraz wdrożenie metodyki demontażu i recyklingu generatora o relatywnie niskim śladzie węglowym, pochodzącego z przydomowej turbiny wiatrowej wraz z odzyskiem surowców strategicznych oraz krytycznych.

W pracy odpowiedziano na następujące pytania problemowe:

- Czy zastosowanie technologii recyklingu generatora turbiny wiatrowej z magnesami trwałymi znacząco obniży ślad węglowy, w stosunku do produkcji generatorów wykorzystujących surowce pierwotne?
- Czy zastosowanie technologii recyklingu generatora z magnesami trwałymi spowoduje dodatkową emisję gazów cieplarnianych do atmosfery?
- Czy opracowaną metodykę wyznaczania śladu węglowego na wytypowanym generatorze można przełożyć na inne typy generatorów?

Przyjęto następującą tezę pracy:

Zastosowanie recyklingu magnesów neodymowych oraz zasad gospodarki obiegu zamkniętego w produkcji generatorów do turbiny wiatrowej zmniejszy emisję śladu węglowego w stosunku do produkcji generatorów wykorzystujących surowce pierwotne. Zastosowanie procesu recyklingu wiąże się z nowym źródłem gazów cieplarnianych, które musi zostać uwzględnione w aspekcie wyznaczania śladu węglowego w ciągu określonego cyklu życia generatora.

Zakres pracy:

Zakres pracy obejmuje zadania naukowe oraz zadania wdrożeniowe. W ramach zadań naukowych przeprowadzono dogłębną analizę literaturową, polegającą na rozszerzeniu wiedzy z zakresu turbin wiatrowych, pierwiastków ziem rzadkich, cyklu życia produktu oraz wyznaczania śladu węglowego. Przeanalizowano również trendy związane ze śladem węglowym, obowiązującymi przepisami oraz dyrektywami z zakresu poruszanego zagadnienia. Na podstawie przeprowadzonych analiz oraz trendów wytypowano generator, który w związku z rosnącą popularnością, znajduje zastosowanie w przydomowych turbinach wiatrowych. Po przeanalizowaniu dostępnych standardów oceny życia produktu (LCA) wybrano ocenę zgodną z protokołem GHG, definiującym wytyczne dotyczące raportowania emisji gazów cieplarnianych (wartość śladu węglowego) związanych z produktem na przestrzeni całego cyklu jego życia. Wyznaczenie wartości śladu węglowego produkcji, użytkowania i recyklingu generatora, rozpoczęto od opracowania metodyki demontażu, a następnie zgodnie z opracowaną metodyką przeprowadzono demontaż części składowych generatora. Kolejny etap polegał na wyznaczaniu wartości śladu węglowego, w poszczególnych etapach cyklu życia generatora. Do tego celu wykorzystano ogólnodostępne bazy danych oraz wykorzystano

program SimaPro. Dobór programu wynika z zawartej w nim bogatej bazy danych oraz zaawansowanej metody raportowania pełnego cyklu życia produktu.

Celem potwierdzenia tez związanych z zasadnością przeprowadzenia procesu recyklingu (redukcja wartości śladu węglowego), opracowano proces recyklingu, obejmujący analizę wrażliwości. Zakłada on różne scenariusze odległości oraz typy wykorzystania transportu z miejsca demontażu do miejsca recyklingu generatora, co przekłada się na zróżnicowaną wartość śladu węglowego. Ostatni etap pracy obejmuje wyznaczenie wartości śladu węglowego dla poszczególnych wariantów recyklingu generatora oraz skonfrontowanie wyników z wyznaczoną wartością śladu węglowego generatora, dla którego nie prowadzono recyklingu magnesów neodymowych.

Każdy z etapów został podsumowany, następnie opisany w postaci publikacji naukowej, a następnie przedstawiony na konferencjach naukowych.

Zgodnie z założeniami doktoratu wdrożeniowego, wdrożono w ITG KOMAG następujące zadania:

- Wdrożenie przyjętych procedur, zgodnych z obowiązującymi przepisami oraz dyrektywami z zakresu poruszanego zagadnienia.
- Wdrożenie procesów opracowanej metodologii demontażu części składowych pozyskanego generatora oraz przygotowanie stanowiska badawczego.
- Wdrożenie wytycznych dotyczących wykorzystywania specjalistycznych programów do wyznaczenia wartości śladu węglowego dla wytypowanego obiektu analiz.
- Wdrożenie procedur związanych z przeprowadzeniem procesu recyklingu elementów składowych generatora turbiny wiatrowej oraz opracowanie metodologii identyfikującej koncentrację pierwiastków ziem rzadkich w turbinie wiatrowej.
- Wdrożenie wytycznych z zakresu ograniczenia wartości śladu węglowego generowanego przez wykorzystywanie technologii turbin wiatrowych (generator turbiny wiatrowej) i ich recykling.

II. Część literaturowa

1. Energetyka wiatrowa w Polsce

Energetyka wiatrowa wykorzystywana jest przez człowieka od początku rozwoju cywilizacji. Energia wiatru już w starożytnym Egipcie, napędzała statki transportujące kamienne bloki Nilem. Europejskie wiatraki początkowo wykorzystywano do mielenia ziaren roślin uprawnych lub do pompowania wody. W 1888 r. w Stanach Zjednoczonych zbudowano pierwszą turbinę wiatrową produkującą energię elektryczną. Światowy rozwój energetyki wiatrowej miał miejsce w latach 80 XX wieku jako konsekwencja kryzysu energetycznego z lat 70 XX wieku [4–6].

Początki energetyki wiatrowej w Polsce przypadają na lata 90 XX wieku. Pierwszą turbinę wiatrową w Polsce (pierwsza turbina produkująca energię elektryczną) uruchomiono w 1991 r. w Żarnowcu. W latach 90-tych, rozwój energetyki wiatrowej w Polsce był obarczony komplikacjami (brak wystarczającego doświadczenia, odpowiednich regulacji prawnych oraz brak rentowność instalacji). Wprowadzone regulację oraz wsparcie organów decyzyjnych, przełożyło się na opłacalność inwestycji w energetykę wiatrową w Polsce [7,8].

W ostatnich dekadach, nastąpił rozwój technologii wykorzystującej siłę wiatru jako źródło energii. Wynika to przede wszystkim z czynników ekologicznych (zmniejszenie emisji CO₂) oraz czynników ekonomicznych. Obecnie realizowana Unijna strategia stawia przed Państwami członkowskimi wyzwanie związane z wdrażaniem odnawialnych źródeł energii oraz całkowitego odejścia od spalania paliw kopalnych. Jednym z odnawialnych źródeł energii są właśnie elektrownie wiatrowe, zarówno te duże przemysłowe, jak i te małe na użytek prywatny [9].

Unia Europejska zobowiązała się do redukcji emisji gazów cieplarnianych o 55% do 2030 r., w stosunku do poziomów z 1990 r. Jednocześnie Rada Unii Europejskiej, Parlament oraz Komisja Europejska wyznaczyły udział energii odnawialnej w unijnym miksie energetycznych na poziomie 42,5%, który należy osiągnąć do końca 2030 r. Według szacunków Komisji Europejskiej udział energetyki wiatrowej w tym okresie musi wzrosnąć do 453 GW (374 GW na lądzie i 79 GW na morzu) [10].

Działania wojenne prowadzone od 2022 r. na Ukrainie, pokazały jak istotne znaczenie w miksie energetycznym mają odnawialne źródła energii. Wskutek zbrojnej agresji Rosji, ceny energii w całej Europie poszybowały w górę, przekładając się również na wzrost inflacji. Pozytywną rolę w ograniczeniu wzrostu cen energii odegrały OZE, a przede wszystkim energia z wiatru. Dlatego istotną kwestią staje się rozwijanie lądowej energetyki wiatrowej w Polsce, która jest i zgodnie z prognozami, będzie najtańszym źródłem energii elektrycznej [10,11].

Z raportu Międzynarodowej Agencji Energetycznej wynika, iż wojna na Ukrainie przyspieszyła transformację polegającą na odejściu od energetyki opartej na węglowodorach i przejściu na energetykę opartą na OZE. Polskie bezpieczeństwo energetyczne jest uzależnione od szybkiego odejścia od paliw kopalnych, w szczególności tych importowanych. Niewielki wzrost mocy energetyki wiatrowej do 8,3 GW w 2022 r., jest efektem wprowadzonej

w 2016 r. ustawy 10H. Ustawa dotycząca odległości nowych inwestycji wiatrowych od zabudowań, jest jedną z najbardziej restrykcyjnych w Europie. Minimalna odległość wynosi dziesięciokrotność wysokości turbiny wiatrowej. Przepisy te w ostatnich latach praktycznie zablokowały rozwój lądowych farm wiatrowych w Polsce. W marcu 2025 r. rząd przyjął nowelizację likwidującą zasadę 10H. W miejsce tej ustawy wprowadzono nowy standard – minimalna odległość turbiny od zabudowań wyniesie 500 metrów [10,12–14].

Obecnie lądowa energetyka wiatrowa jest najtańszym źródłem energii elektrycznej w Polsce. Dodatkowy gigawat mocy w farmach wiatrowych przekłada się na oszczędność 30 PLN w odniesieniu do średniego kosztu wytworzenia 1MWh w Polsce. W 2022 r. udział OZE produkcji energii w Polsce wyniósł 21%, z czego najwyższą wartość uzyskała energetyka wiatrowa – 10,8%. Produkcja energii elektrycznej z energetyki wiatrowej w 2022 r. w stosunku do 2021 r. wzrosła o 15% i wyniosła niemal 19 TWh. Natomiast we wrześniu 2024 r., po raz pierwszy w historii, OZE stanowiły aż 36,8% całkowitej produkcji energii elektrycznej w Polsce. Szczególnie duży wzrost odnotowano w produkcji energii z farm wiatrowych, które wyprodukowały 46,3% energii pochodzącej z OZE i było o 73% więcej niż w tym samym okresie roku poprzedniego [10,15,16].

1.1. Turbina wiatrowa – konstrukcja, zasada działania

Od XIX wieku, energię wiatru przekształca się w energię elektryczną. Urządzeniem zamieniającym energię kinetyczną wiatru w pracę mechaniczną, a następnie w energię elektryczną są turbiny wiatrowe.

Farmy wiatrowe, elektrownia wiatrowa oraz turbina wiatrowa to terminy, które odnoszą się do różnych elementów produkujących energię elektryczną z wiatru. Elektrownia wiatrowa składa się z kompleksu urządzeń oraz konstrukcji, których głównym elementem są turbiny wiatrowe. Farmy wiatrowe są zbiorem kilku lub wielu elektrowni wiatrowych, rozmieszczonych na danym terenie [4,5].

W Polsce, w dalszym ciągu budowane są nowe lądowe farmy wiatrowe. Prawdopodobnie w 2026 r. moc farm zostanie rozszerzona o morskie farmy wiatrowe (farmy Baltic Power – 76 turbin, każda o mocy 15 MW) [17]. Z zakończonych inwestycji wiatrowych w Polsce (I kw. 2023 r.), wyróżnia się trzy największe [18]:

- farma wiatrowa Banie – 106 turbin, o łącznej mocy 243 MW,
- farma wiatrowa Potęgowo - 84 turbin, o łącznej mocy 219 MW,
- farma wiatrowa Biały Bór - 42 turbin, o łącznej mocy 145 MW.

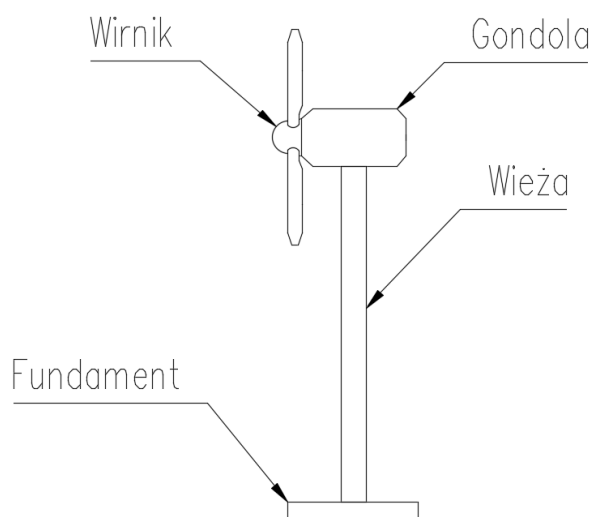
Dla poszczególnych elektrowni wiatrowych prowadzony jest podział ze względu na:

- zastosowanie:
 - przydomowe,
 - przemysłowe,
- lokalizacja:
 - lądowe,
 - morskie,

- moc:
 - mikroelektrownie wiatrowe – urządzenia o mocy <100 W, wykorzystywane do zasilania infrastruktury miejskiej,
 - małe elektrownie wiatrowe – o mocy od 100 W do 50 kW, zapewniające energię elektryczną dla pojedynczych gospodarstw domowych,
 - duże elektrownie wiatrowe – w przedziale mocy od 100 kW do 1 MW, zasilają gospodarstwa domowe oraz wytwarzają prąd do sieci elektromagnetycznej,
 - zawodowe elektrownie wiatrowe – o mocy >100 MW, wykorzystywane w lądowych lub morskich farmach wiatrowych,
- rozwiązania konstrukcyjne:
 - o poziomej osi obrotu – powszechnie stosowane, najczęściej wyposażone w wirnik trzyłopatowy (Rys.1),
 - o pionowej osi obrotu - charakteryzują się obracaniem wirnika wokół pionowej osi, stanowią jedynie kilka procent wszystkich instalacji [4,19,20].

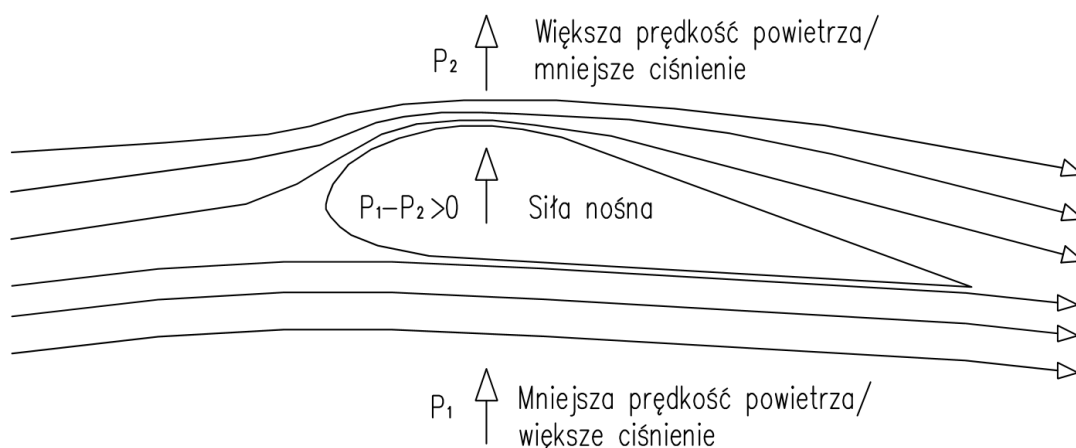
Turbina wiatrowa, stanowiąca podstawowe urządzenie do produkcji energii elektrycznej z wiatru, składa się z następujących podstawowych elementów (Rys.1):

- wirnik,
- gondola,
- wieża,
- fundament [21].



Rys.1. Podstawowe elementy turbiny wiatrowej [opracowanie własne]

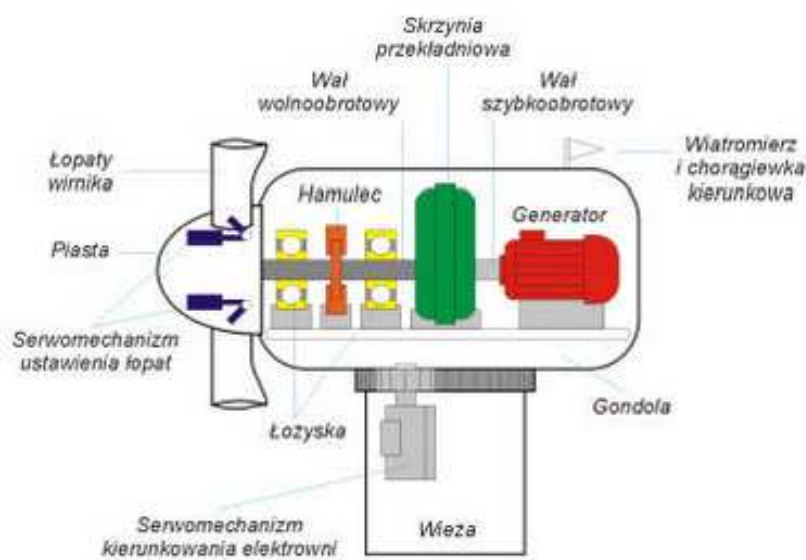
Podstawowym zjawiskiem fizycznym wykorzystywanym do produkcji energii elektrycznej jest konwersja energii wiatru, który wprowadza łopatki turbiny w ruch obrotowy. Wykorzystywane jest zjawisko powstawania zróżnicowanego ciśnienia po dwóch stronach łopatki turbiny, wynikające ze zróżnicowanych prędkości opływającego powietrza (Rys.2) [10].



Rys.2. Konwersja energii wiatru na łopatkę turbiny wiatrowej [opracowanie własne]

Niesymetryczny kształt profilu łopatki powoduje, że powietrze opływające łopatkę z jednej strony pokonuje dłuższą drogę. Powietrze to pokonuje ją szybciej, aniżeli powietrze z drugiej strony łopatki. W związku z czym, w miejscu gdzie prędkość powietrza jest większa, panuje niższe ciśnienie (P_2). Ze względu na mniejszą prędkość z drugiej strony łopatki, ciśnienie jest większe (P_1). Różnica ciśnień powoduje wytworzenie siły nośnej, oddziałującej na łopatkę, wprowadzając ją w ruch obrotowy [10,20].

Ruch obrotowy wirnika zamieniany jest na prąd elektryczny za sprawą generatora elektrycznego. Na wale osadzony jest wirnik, który napędza generator (z ewentualnym zastosowaniem dodatkowej przekładni) (Rys.3). W piaście wirnika znajduje się serwomechanizm umożliwiający ustawienie kąta nachylenia łopat (najczęściej stosowane są wirniki trójłopatkowe). Na szczycie wieży znajduje się gondola, mająca możliwość obrotu o 360° przy pomocy serwomechanizmu, który umożliwia ustawienie turbiny wiatrowej zgodnie z kierunkiem wiatru, w celu uzyskania maksymalnej wydajności [22,23].

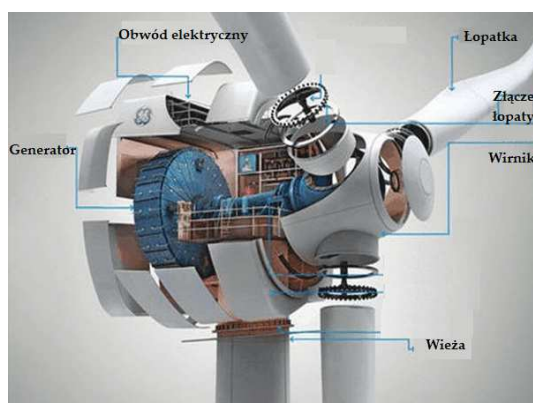


Rys.3. Budowa turbiny wiatrowej [22]

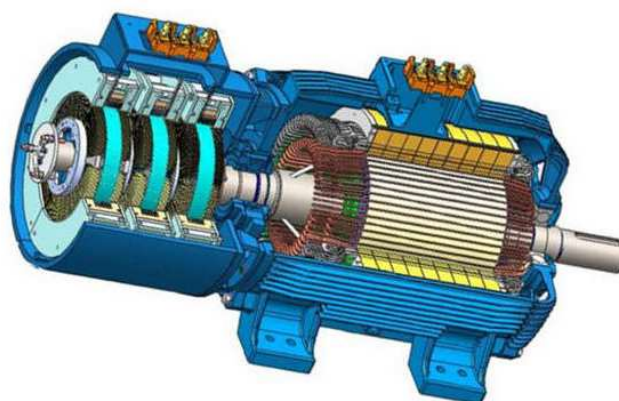
W turbinach wiatrowych wykorzystywane są dwa typy generatorów – turbiny bezprzekładniowe z generatorem synchronicznym lub przekładniowe z generatorem asynchronicznym.

Generatory synchroniczne (Rys. 4) nie posiadają przekładni, będąc bezpośrednio połączone z wirnikiem turbiny. Ze względu na brak przekładni, a co za tym idzie niewielką prędkość obrotową koła wiatrakowego (max 40 obr/min), generatory tego typu posiadają dużą liczbę par biegunów (do 40 i więcej) [22,24].

Generatory asynchroniczne (Rys. 5) obracają się z prędkością synchroniczną wynoszącą 750 i 1500 obr/min. Celem dostosowania prędkości wirowania maszyny asynchronicznej do prędkości obrotowej koła wiatrakowego, wykorzystywane są przekładnie mechaniczne (przełożenie 60x) [22,25].



Rys.4. Turbina wiatrowa z generatorem synchronicznym [22]



Rys.5. Generator asynchroniczny [22]

Większość turbin wiatrowych wyposażona jest w rozwiązania z zastosowaniem przekładni oraz generatora synchronicznego. W synchronicznych generatorach turbin wiatrowych wykorzystywane są magnesy neodymowe, należące do rodziny magnesów ziem rzadkich. Są one najsilniejszymi magnesami trwałymi na świecie. Nazywane są również magnesami NdFeB lub NIB, ponieważ składają się głównie z neodymu (Nd), żelaza (Fe) i boru (B). Są stosunkowo nowym wynalazkiem i dopiero niedawno stały się dostępne dla codziennego użytku [26–28].

Generator w turbinie wiatrowej wykorzystuje zjawisko indukcji magnetycznej. W generatorze znajdują się wirnik z magnesami neodymowymi na statorze. Magnesy te wytwarzają stałe pole elektromagnetyczne. Nieruchome linie tego pola pod wpływem ruchu wirnika (napędzanego siłą wirnika), zostają przerywane, dzięki czemu możliwa jest zamiana energii mechanicznej na energię elektryczną [28].

Produkcja generatora, jak również całej turbiny wiatrowej, wiąże się ze zużyciem surowców o znaczeniu strategicznym oraz krytycznym. Surowce potrzebne do wyprodukowania turbiny wiatrowej są następujące:

- Fundament:
 - kruszywo oraz tłuczeń (wydobywane na całym świecie),
 - glina oraz łupki ilaste (wydobywane na całym świecie),

- gips (w przypadku wydobycia surowca pierwotnego) (wydobycie m.in.: Brazylia, USA, Pakistan, Australia, czy Tajlandia),
- wapień (57% produkcji w Chinach),
- piasek krzemionkowy (wydobywane na całym świecie),
- Elementy konstrukcyjne:
 - boksyt (wydobycie m.in.: Gwinea, Jamajka, Brazylia),
 - molibden (produkcja kontrolowana przez Chiny),
- Elementy mechaniczne (magnesy, baterie):
 - kobalt (wydobycie m.in.: Chiny, Demokratyczna Republika Konga, Kanada),
 - pierwiastki ziem rzadkich (produkcja kontrolowana przez Chiny),
- Okablowanie, oprzyrządowanie oraz pozostałe elementy:
 - węgiel (wydobywane na całym świecie),
 - miedź (wydobycie m.in.: Chile, Peru, Australia),
 - ruda żelaza (wydobywane na całym świecie),
 - cynk (wydobycie m.in.: Chiny, Australia, Peru) [29–31].

1.2. Zalety i wady energetyki wiatrowej

Turbiny wiatrowe uważane są za stosunkowo ekologiczne źródło energii odnawialnej, posiadając zarówno szereg zalet jak i wad. W dalszym ciągu rozwijane są technologie mające na celu minimalizację negatywnego wpływu turbin na środowisko naturalne oraz zwiększenia ich efektywności. Do niewątpliwych zalet energetyki wiatrowej zalicza się m.in.:

- niewielka ilość odpadów, brak konieczności doprowadzania wody do chłodzenia oraz brak generowanych ścieków,
- minimalna emisja CO₂ podczas procesu produkcji elektrycznej,
- tania energia uzyskana przez właściwie ułożoną farmę wiatrową (ze względu na siłę wiatru),
- niski koszt eksploatacji (pomijając koszty inwestycyjne nowych urządzeń),
- farmy wiatrowe o porównywalnej ilości wytworzonej energii w stosunku do konwencjonalnych elektrowni, zajmują mniejszą powierzchnię,
- możliwość lokacji inwestycji na terenach charakteryzujących się wymagającą rzeźbą terenu,
- elastyczność przestrzenna, tzn. możliwość wykorzystania małej turbiny do zasilania gospodarstwa domowego, dużej turbiny na potrzeby energetyki przemysłowej, bądź farmy wiatrowej do zasilania miasta na poziomie elektrowni konwencjonalnej.

Turbiny wiatrowe od zawsze wzbudzały kontrowersję i były tematem debat, głównie z uwagi na potencjalne zagrożenie dla człowieka oraz środowiska. Do wad związanych z wykorzystaniem energetyki wiatrowej zalicza się m.in.:

- nieprzewidywalność uzyskiwanej mocy turbin, uzależniona od siły wiatru (niewielki lub silny wiatr powoduje wyłączenie turbiny),
- budowa turbin wymaga znacznego zużycia surowców, m.in. o znaczeniu strategicznym oraz krytycznym,

- procesy produkcyjne poszczególnych elementów turbiny są odpowiedzialne za wysoką wartość śladu węglowego,
- stanowią niebezpieczeństwo dla ptaków oraz nietoperzy, szczególnie jeżeli znajdują się na ich trasach migracyjnych,
- opór społeczny związany z negatywnym wpływem na estetykę krajobrazu i generowany hałas,
- niepełny stopień recyklingu turbin oraz ograniczona infrastruktura, powodująca konieczność transportu elementów wycofanych z eksploatacji na duże odległości (generuje to dodatkowe koszty i negatywnie wpływa na środowisko) [32,33].

1.3. Mikroinstalacje wiatrowe w Polsce

Mikroinstalacje wiatrowe to małe elektrownie wiatrowe, przeznaczone do produkcji energii elektrycznej na niewielką skalę. Zazwyczaj są to turbiny wiatrowe o mocy do kilku kilowatów, zainstalowane na terenach wiejskich lub przydomowych. Celem tego typu instalacji jest dostarczanie energii elektrycznej na potrzeby gospodarstw domowych, małych firm, czy też innych niewielkich odbiorców. Zastosowanie mikroinstalacji wiatrowych może przynieść następujące korzyści:

- Niezależność energetyczna - możliwość częściowej lub całkowitej niezależności energetycznej gospodarstw domowych lub małych przedsiębiorstw.
- Oszczędność - możliwość oszczędności finansowych w opłatach za energię elektryczną.
- Ochrona środowiska – wykorzystanie wiatru do produkcji energii elektrycznej jest bardziej przyjazne dla środowiska niż tradycyjne źródła [34,35].

Dotychczas w Polsce mikroinstalacje wiatrowe nie cieszyły się tak dużą popularnością jak mikroinstalacje fotowoltaiczne. Stan mikroinstalacji wiatrowych na koniec marca 2023 r. to zaledwie 57 instalacji (o mocy 0,3 MW), wobec około 1,3 mln mikroinstalacji fotowoltaicznych. Barierą zniechęcającą do inwestycji w przydomowe turbiny wiatrowe, była konieczność uzyskania pozwolenia budowlanego [10,34,35].

Ministerstwo Rozwoju i Technologii złożyło projekt ułatwiający inwestycje w mikroinstalacje wiatrowe, znosząc obowiązek uzyskania na nie pozwolenia budowlanego. Zgoda budowlana w przypadku instalacji o całkowitej wysokości w przedziale 3-12 m, zostanie zastąpiona koniecznością ich zgłoszenia. Moc tego typu wolnostojących elektrowni wiatrowych nie może przekraczać 50 kW. W przypadku mikroinstalacji wiatrowych o wysokości nieprzekraczającej 3 m, zostaną one zwolnione z obowiązku pozwolenia budowlanego oraz zgłoszenia. Projekt ustawy umożliwia właścicielowi instalacji przyłączenie jej do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV. Zapisy ustawy mają ułatwić właścicielom skorzystanie z programów dofinansowania, które przeznaczone są na inwestycje w mikroinstalacje OZE [10,36].

Rozwój mikroinstalacji wiatrowych w Polsce zwiększy efektywność i dostępność finansową, co przyczyni się do zwiększenia ich popularność. Inną kwestią jest recykling mikroinstalacji wiatrowych, który stanowi ważne wyzwanie z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju [10,36].

1.4. Recykling turbin wiatrowych

Energetyka wiatrowa jest stosunkowo młodą gałęzią przemysłu, z rozwijającym się praktycznym doświadczeniem z zakresu demontażu i recyklingu turbin wiatrowych. Coraz częściej producenci ustalają cele dotyczące możliwości recyklingu swoich turbin. Obecnie podejmowane decyzje, dotyczące projektowania turbiny, wpłyną na fazę demontażu i recyklingu za 30-40 lat. Faza rozwoju nowej turbiny wiatrowej trwa około 5 lat, natomiast planowanie budowy dużej farmy wiatrowej około 5-10 lat. Żywotność turbin wiatrowych, wynosi około 20-25 lat (w niektórych przypadkach 35 lat) [2,37,38].

Szacuje się, że do końca 2023 r. na całym Świecie wycofanych zostanie około 14 000 turbin, o łącznej masie na poziomie 40 000 – 60 000 ton. W samych krajach Unii Europejskiej wycofanych zostanie ok. 4 000 turbin. Dodatkowo, ze względu na zmianę generacji turbin wiatrowych (na posiadającą wyższą sprawność), liczba turbin wiatrowych zmniejszy się o jedną trzecią [2,39,40].

Demontaż turbiny wiatrowej jest kluczowym elementem cyklu życia. Celem demontażu jest bezpieczne oraz skuteczne usunięcie instalacji, pozwalając na ponowne wykorzystanie jak największej liczby elementów. Proces demontażu turbiny wiatrowej (na przykładzie lądowej turbiny wiatrowej) odbywa się w następujących podstawowych krokach [39–41]:

- ocena stanu technicznego – wstępna ocena obejmująca badania strukturalne, mechanizmy bezpieczeństwa, systemy energetyczne oraz pozostałe kluczowe elementy,
- przygotowanie planu demontażu – określa następujące po sobie kroki demontażu instalacji, dostępne zasoby oraz konieczne do przedsięwzięcia środki bezpieczeństwa,
- zabezpieczenie pracowników – dostarczenie sprzętu ochronnego dla pracowników,
- usunięcie łopat wirnika turbiny – w pierwszej kolejności demontowane są łopaty, następnie cięte, umożliwiając ich transport z miejsca demontażu,
- demontaż gondoli oraz wieży – elementy demontowane są stopniowo, utrzymując stałą równowagę konstrukcji. Demontaż obejmuje usunięcie elementów znajdujących się w gondoli turbiny za pomocą dźwigu, a następnie rozbiórkę sekcji wieżowych,
- wstępna obróbka elementów na miejscu demontażu – wstępna segregacja na miejscu demontażu, poprzez separację metali, a także innych materiałów w tym kompozytowych,
- transport oraz przetwarzanie – demontowane elementy są transportowane do zakładów prowadzący recykling. Poszczególne grupy materiałów kierowane są do odpowiednich zakładów recyklingu,
- recykling i przetwarzanie – metale (np. stal czy aluminium) są przetwarzane w zakładach recyklingu metali. Komponenty oraz materiały charakteryzujące są skomplikowanym stopniem przetwarzania, poddawane są procesom recyklingu chemicznego, termicznego lub mechanicznego,
- usuwanie fundamentu – proces obejmujący usunięcie fundamentu turbiny, zabezpieczenie otoczenia oraz oczyszczenie terenu,
- rekultywacja terenu – teren po demontażu instalacji zostaje rekultywowany, przywracając stan pierwotny lub dostosowując do innych celów,

- dokumentacja i monitoring – proces demontażu jest dokumentowany, a wszelkie zmiany rzeźby terenu są dokumentowane.

Proces wycofywania z eksploatacji turbiny, różni się ze względu na różnice wynikające z rozmiaru konstrukcji, lokalizacji oraz innych czynników. Produkcja nowoczesnych turbin wiatrowych wymaga dużych zasobów materiałowych oraz wysokiego zużycia energii. Liczba turbin wiatrowych na Świecie przekroczyła 350 000 sztuk, a co za tym idzie wiele materiałów i zapotrzebowania energetycznego jest związanych z tymi urządzeniami. Poszczególne instalację różnią się ze względu na zastosowanego producenta, wybór technologii i inne parametry. Niemniej jednak materiały oraz większość komponentów wchodzących w skład turbiny wiatrowej są do siebie podobne [37,38].

Zrealizowane badania, (Jensen i inni) [38] polegające na analizie materiałowej farmy wiatrowej o mocy 60 MW, pozwoliły na określeniu wagowego zapotrzebowania na poszczególne grupy materiałowe analizowanego układu (Tabela 1). Wyznaczono tym samym masę poszczególnych materiałów, możliwych do recyklingu.

Tabela 1. Materiały możliwe do recyklingu na przykładzie farmy turbin wiatrowych o mocy 60 MW [38].

Materiały	Masa materiałów (kg)
Metale żelazne	6 560 00
Aluminium	104 000
Materiały kompozytowe	660 000
Oleje smarujące	30 000
Elektronika	124 000
Baterie	36 000
Lampy fluorescencyjne	3 800
Magnesy trwałe (NdFeB)	40 000
Miedź	292 000
Drewno (Balsa)	29 000
Polietylen	32 000
Polipropylen	6 600
Polichlorek winylu (PVC)	6 000
Inne (poniżej 1% łącznej masy)	-
Suma:	7 923 400

Poszczególne grupy materiałowe (tabela 1) scharakteryzowano pod kątem energochłonności i wpływu środowiskowego przy produkcji pierwotnego surowca oraz możliwości ograniczenia negatywnego wpływu przy zastosowaniu recyklingu. Wyniki analizy są następujące [38]:

Metale żelazne

Metale żelazne są najczęściej wykorzystywanym materiałem w turbinach wiatrowych. Pochodzenie materiału wynika z jednej z czterech metod produkcji stali: wielki piec, piec łukowy, redukcja bezpośrednia lub redukcja metalurgiczna. Energia potrzebna do produkcji 1 kg stali różni się w zależności od przyjętej metody. Przykładowo energia konieczna do

produkcji stali z zastosowaniem metod pierwotnych wynosi: wielki piec – 14 MJ, redukcji bezpośredniej/ piec łukowy – 19,2 MJ, natomiast w metodzie recyklingowanej (piec łukowy – 11,7 MJ). Nakład energetyczny różni się w zależności od przyjętej metody produkcyjnej oraz prowadzonego recyklingu. Stal jest metalem, który może zostać poddany procesowi wielorazowego odzysku i posiada wysoce rozwinięty rynek wtórny. Utrudnieniem jest różnorodny stopów z różnymi pierwiastkami stopowymi (Cr, Mn, B, Nd), zwiększający złożoność stali oraz utrudniający recykling [38].

Aluminium

Aluminium wykorzystywane jest do produkcji kabin, drabinek lub platform turbiny wiatrowej. Recykling tego metalu jest ważną częścią przemysłu związanego z produkcją aluminium. Wynika to w głównej mierze z konieczności redukcji negatywnego wpływu środowiskowego w porównaniu do produkcji pierwotnej. Tak jak w przypadku stali, istnieje możliwość wielokrotnego odzysku aluminium, bez istotnej utraty właściwości. Pierwotna produkcja surowca jest wysoce energochłonna, a wskaźnik recyklingu wynosi około 27%. Zapotrzebowanie energetyczne produkcji pierwotnego aluminium wynosi 47 MJ/kg^{-1} , natomiast produkcja aluminium z recyklingu jest znacząco niższa, wynosząc $2,4 \text{ MJ/g}^{-1}$ (95% oszczędność) [38].

Materiały kompozytowe

Materiały kompozytowe są głównym składnikiem łopat oraz kabiny. Łopaty wykonane są z włókna szklanego w postaci włókna wzmacnianego, epoksydu, drewna oraz powłoki poliuretanowej. Recykling materiału kompozytowego jest wysoce skomplikowany. Obecnie wycofane z użytkowania łopaty zostają składowane, spalane lub poddawane recyklingowi (mechaniczny, pirolityczny lub chemiczny). Składowanie jest coraz częściej zakazane w poszczególnych krajach (np. w Niemczech). Najczęściej zużyte łopaty zostają spalane, co generuje odpady w postaci popiołu (który zostaje składowany, bądź wykorzystywany w materiałach budowlanych). Alternatywna metoda przewiduje recykling łopat turbiny wiatrowej. Podstawowym problemem jest niewielka opłacalność ekonomiczna recyklingu włókna szklanego oraz rynek zbytu. Pierwotne włókno jest bardzo tanie, a zatem odbiorcom nie opłaca się zakup włókna z odzysku. Materiał ten źle znosi proces recyklingu, tracąc przy tym część właściwości. W celu przywrócenia odpowiednich właściwości włókna szklanego, wymagane są kosztowne procesy chemiczne. Jednym z przykładów ponownego wykorzystania materiału pochodzącego z wycofanych łopat jest jego zastosowanie jako dodatek do cementu. Inna koncepcja zakłada wykorzystanie łopat w małej architekturze i budownictwie (zadaszenie wiat rowerowych, przystanków, czy elementów architektury parkowej) [38].

Obecnie prowadzone są intensywne prace nad poprawą recyklingu łopat, polegające na przetworzeniu włókna szklanego. Do tego celu wykorzystano wielkoskalową instalację testową pirolizy, która została opracowana przez Makeen Energy. Odzyskane włókno nadaje się do ponownego zastosowania na równi z materiałem pierwotnym. Testowa instalacja ma realne szanse na komercjalizację [4,38].

Inwestorom najczęściej bardziej opłaca się zakup nowych łopat turbin wiatrowych. Energia potrzebna do wyprodukowania 1 kg materiału kompozytowego wynosi 111 MJ/kg^{-1} , natomiast

szacowany recykling (materiał o niższej jakości w porównaniu do materiału pierwotnego) zmniejszy zużycie energii o 19 MJ/kg⁻¹ [38].

Oleje smarujące

Odpowiednio odzyskany olej po procesie rafinacji może ponownie zostać pełnowartościowym produktem. W wyniku tego procesu powstaje bazowy olej smarujący, podobnie jak w przypadku rafinacji ropy naftowej. Oczyszczony z zanieczyszczeń (brud, woda, paliwo, zużyte dodatki), można wielokrotnie poddać recyklingowi. Energia konieczna do produkcji pierwotnego oleju wynosi około 10 MJ/kg, natomiast w przypadku oleju z recyklingu ponad dwukrotnie mniej, 3,4 MJ/kg [38].

Elektronika

Zużyty sprzęt elektryczny oraz elektroniczny (WEEE) stanowi odpady trudne do odseparowania i recyklingu, co związane jest z ich skomplikowanym składem materiałowym. Najczęściej tego typu odpady trafiają do zakładów przeróbczych, w których wydziela się koncentraty miedzi oraz odzyskuje wybrane metale szlachetne. Ważne żeby wszystkie WEEE były poddawane recyklingowi, ponieważ pierwiastki w nich zawarte charakteryzują się dużą wartością finansową. Rozwój technologii wiatrowej powoduje, że wykorzystywane są coraz bardziej zaawansowane i skomplikowane komponenty elektroniczne, dlatego tym bardziej istotne jest osiągnięcie recyklingu wszystkich pierwiastków. W związku ze zróżnicowanym składem, utrudnione jest wyznaczenie zapotrzebowania energetycznego przy produkcji, czy wskaźnika recyklingu [38].

Baterie

Baterie wykorzystywane są w różnych podzespołach turbiny (np. system monitorujący SCADA), w zależności od typu, generują zróżnicowane zapotrzebowanie energetyczne. Zapotrzebowanie energetyczne oraz emisje CO₂ podczas produkcji baterii są stosunkowo wysokie, natomiast recykling istotnie zmniejsza emisję środowiskową (nawet o 17,9 kg CO₂/kg) [38,42].

Lampy

Recykling lamp jest niezwykle trudnym procesem, wynika to z wielomateriałowego charakteru produktu. W celu odzysku większości materiałów oraz odzysku szkodliwych substancji (rtęć), konieczne jest wdrożenie różnych procesów przeróbczych. W przypadku odzysku fosforów ze świetlówek fluorescencyjnych, proces jest stosunkowo prosty. Fosforki w postaci proszku odzyskiwane są z wykorzystaniem hydrometalurgicznych metod wzbogacania. Energia potrzebna do wyprodukowania jednej świetlówki fluorescencyjnej wynosi 14,7 MJ, natomiast lampy LED wynosi 35 MJ/kg. Dane dotyczące możliwej redukcji zapotrzebowania energetycznego dla recyklingu lamp z turbiny nie są dostępne [38].

Magnesy trwałe NdFeB

Magnesy trwałe z pierwiastkami ziem rzadkich (REE – rare earth elements) składają się z takich pierwiastków jak żelazo, neodym, bor czy dysproz. Recykling REE jest na niskim poziomie (rekordowo niski <1% w 2018r.). W przypadku magnesów NdFeB, ponowne wykorzystanie i ich recykling jest możliwy. Wynika to z faktu, iż są stosunkowo duże, dostępne oraz możliwe do demontażu. Proces recyklingu jest złożony oraz wymaga zastosowania m.in. chemicznych procesów wzbogacania. Szacuję się, że zużycie energetyczne pierwotnej produkcji magnesów trwałych wynosi 330 MJ/kg, natomiast w przypadku produkcji magnesów z recyklingu to 191,4 MJ/kg. Metody recyklingu tego typu magnesów są przedmiotem opracowań, poprawiających opłacalność ekonomiczną oraz redukcję wpływu środowiskowego [38].

Miedź

Miedź jest metalem posiadającym wiele zastosowań. W turbinie wiatrowej znajdują się w uzwojeniu generatora, transformatorach oraz kablach i przewodach. Miedź produkowana jest z wykorzystaniem procesów pirometalurgicznych oraz hydrometalurgicznych. W zależności od przyjętej metody recyklingu miedzi, uzyskuje się różne oszczędności energetyczne. W przypadku pierwotnej produkcji miedzi, pirometalurgia zużywa 10,6 MJ/kg, a hydrometalurgia 19,2 MJ/kg. Produkcja miedzi pochodzącej z recyklingu zużywa zaledwie 6,3 MJ/kg i tak jak w przypadku stali istnieje możliwość wielokrotnego recykling [38].

Drewno balsa

W przeciwieństwie do stali i betonu, drewno jest pozyskiwane z naturalnych procesów biologicznych. Drewno typu Balsa składa się w 50% z węgla, 44% tlenu, 6% wodoru. Porównując z innymi materiałami, drewno wymaga niewielkiej energii w procesach produkcyjnych i obróbce. Produkty drewniane mogą zostać ponownie użyte lub poddane recyklingowi. Energia konieczna do wyprodukowania drewna balsa uzależniona jest od regionów skąd pochodzi i wynosi około 7,5 MJ/kg. Recykling drewna pozwala zaoszczędzić około 6,4 MJ/kg [38].

Tworzywa sztuczne

Tworzywa sztuczne (polietylen (PE), polipropylen (PP) i polichlorek winylu (PVC) są syntetycznymi polimerami organicznymi, produkowanymi z surowców petrochemicznych. Ich właściwości fizyko-chemiczne, umożliwiają między innymi łatwe formowanie. Tworzywa sztuczne w postaci dodatków stanowią przeszkodę w recyklingu. Najczęściej materiały tego typu poddawane są recyklingowi mechanicznemu, obejmującemu następujące etapy: sortowanie, rozdrabnianie, mycie i suszenie oraz topienie i ponowna obróbka do postaci granulatu (lub finalnego produktu). Zapotrzebowanie energetyczne dla PE wynosi 76,7 MJ/kg, PP - 73,4 MJ/kg, a PVC - 56,7 MJ/kg. Zapotrzebowanie w przypadku produktu pochodzącego z recyklingu waha się między 8 a 55 MJ/kg [38].

Podsumowując, produkcja generatorów wiatrowych i turbin wiatrowych jest niezwykle ważna z punktu widzenia rozwoju energetyki odnawialnej, należy jednak pamiętać, że do ich produkcji wykorzystywane są surowce nieodnawialne. W nowoczesnych turbinach wiatrowych stosowane są magnesy neodymowe ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), w skład których wchodzi cenne pierwiastki ziem rzadkich (REE: neodym, dysproz, prazeodym). Pierwiastki ziem rzadkich ze względu na swoją wartość rynkową, znajdują się na Unijnej liście 30-stu surowców o krytycznym znaczeniu strategicznym w perspektywie rozwoju zaawansowanych technologii. Z prognoz analityków rynku surowcowego wynika, iż zapotrzebowanie na pierwiastki ziem rzadkich w najbliższych latach będzie rosło, przewyższając popyt na jakikolwiek inny surowiec, podwajając się do 2060 r [43–45].

Efektywny recykling surowców strategicznych z turbin wiatrowych to nie tylko wyzwanie, ale również szansa na stworzenie bardziej zrównoważonego i ekologicznego podejścia do produkcji energii odnawialnej. Obecnie około 80-90% masy podzespołów elektrowni wiatrowej poddawana jest recyklingowi, głównie są to stalowe elementy konstrukcyjne fundamentu, elementy gondoli, czy wieży. Problem stwarza pozostałe 10-20%, przede wszystkim łopaty wirnika, magnesy trwałe NdFeB oraz osłona gondoli. W przypadku łopat turbiny wiatrowej koniecznym jest prowadzenie procesu recyklingu, który jest opłacalnym rozwiązaniem pod względem technicznym oraz ekonomicznym oraz przekonanie odbiorców do produktów pochodzącego z tego procesu [39,46].

Recykling surowców strategicznych z turbin wiatrowych jest kluczowym elementem zrównoważonego podejścia do gospodarki obiegu zamkniętego oraz jest szczególnie ważny w aspekcie organicznych zasobów naturalnych. Efektywny recykling surowców strategicznych jest zarówno kwestią ekologiczną, a także ekonomiczną. Proces recyklingu może pomóc w zmniejszeniu ilości odpadów, obniżeniu zużycia surowców pierwotnych oraz znacząco ograniczyć emisję gazów cieplarnianych, bezpośrednio związanych z wydobywaniem nowych surowców [37].

Powyższe uwarunkowania wymuszają opracowanie technologii recyklingu elementów zebranych wokół zespołu roboczego turbiny wiatrowej. Przeprowadzenie recyklingu niesie ze sobą kosztowne oraz energochłonne procesy, ale co istotne proces ten może ograniczyć wysoką wartość śladu węglowego życia danego produktu.

2. Produkcja i recykling magnesów neodymowych

Nowoczesne magnesy neodymowe oparte są na fazach międzymetalicznych oraz na pierwiastkach ziem rzadkich (REE). REE to grupa 17 pierwiastków (lantanowce, skand i itr), które dzieli się na lekkie (LREE) i ciężkie (HREE) (Rys.6). Większość tych pierwiastków wbrew nazwie nie występuje rzadko, lecz głównym problemem stanowi ich rozproszenie w skorupie ziemskiej (HREE występują w stosunkowo niższej koncentracji). Posiadają strategiczne znaczenie gospodarcze w perspektywie rozwoju nowoczesnych technologii [47,48].

UKŁAD OKRESOWY PIERWIASTKÓW																		18
1 H Wodór 1,01																	2 He Hel 4,00	
2												13	14	15	16	17		
3 Li Lit 6,94	4 Be Beryl 9,01											5 B Bor 10,81	6 C Węgiel 12,01	7 N Azot 14,01	8 O Tlen 16,00	9 F Fluor 19,00	10 Ne Neon 20,18	
11 Na Sód 23,00	12 Mg Magnez 24,31											13 Al Glin 26,98	14 Si Krzem 28,08	15 P Fosfor 30,97	16 S Siarka 32,07	17 Cl Chlor 35,45	18 Ar Argon 39,95	
19 K Potas 39,10	20 Ca Wapń 40,08	21 Sc Skand 44,96	22 Ti Tytan 47,88	23 V Wanad 50,94	24 Cr Chrom 52,00	25 Mn Mangan 54,94	26 Fe Żelazo 55,85	27 Co Kobalt 58,93	28 Ni Nikiel 58,69	29 Cu Miedź 63,55	30 Zn Cynk 65,39	31 Ga Gal 69,72	32 Ge German 72,61	33 As Arsen 74,92	34 Se Selen 78,96	35 Br Brom 79,90	36 Kr Krypton 83,80	
37 Rb Rubid 85,47	38 Sr Stront 87,62	39 Y Itr 88,91	40 Zr Cykon 91,22	41 Nb Niob 92,91	42 Mo Molibden 95,94	43 Tc Technet 97,91	44 Ru Ruten 101,07	45 Rh Rod 102,91	46 Pd Pallad 106,42	47 Ag Srebro 107,87	48 Cd Kadm 112,41	49 In Ind 114,82	50 Sn Cyna 118,71	51 Sb Antymon 121,76	52 Te Tellur 127,60	53 I Jod 126,90	54 Xe Ksenon 131,29	
55 Cs Cez 132,91	56 Ba Bar 137,33	57 La Lantan 138,91	58 Ce Cer 140,12	59 Pr Praseodym 140,91	60 Nd Neodym 144,24	61 Pm Promet 144,91	62 Sm Samar 150,36	63 Eu Europ 151,96	64 Gd Gadolin 157,25	65 Tb Terb 158,93	66 Dy Dysproz 162,50	67 Ho Holm 164,93	68 Er Erb 167,26	69 Tm Tul 168,93	70 Yb Iterb 173,04	71 Lu Luteł 174,97		
87 Fr Frans 223,02	88 Ra Rad 226,03	89 Ac Aktyn 227,03	104 Rf Ruterford 261,11	105 Db Dubn 263,11	106 Sg Seaborg 265,12	107 Bh Bohr 264,10	108 Hs Has 269,10	109 Mt Meitner 268,10	110 Ds Darmstadt 281,10	111 Rg Roentgen 280	112 Cn Kopernik 285	113 Uut Ununtri 284	114 Fl Flerow 289	115 Uup Ununpent 289	116 Lv Liwermor 293	117 Uus Ununsept 294	118 Uuo Ununokt 294	
LANTANOWCE			58 Ce Cer 140,12	59 Pr Praseodym 140,91	60 Nd Neodym 144,24	61 Pm Promet 144,91	62 Sm Samar 150,36	63 Eu Europ 151,96	64 Gd Gadolin 157,25	65 Tb Terb 158,93	66 Dy Dysproz 162,50	67 Ho Holm 164,93	68 Er Erb 167,26	69 Tm Tul 168,93	70 Yb Iterb 173,04	71 Lu Luteł 174,97		
AKTYNOWCE			90 Th Tor 232,04	91 Pa Protaktyn 231,04	92 U Uran 238,03	93 Np Neptun 237,05	94 Pu Pluton 244,06	95 Am Ameryk 243,06	96 Cm Kiur 247,07	97 Bk Berkel 247,07	98 Cf Kaliforn 251,08	99 Es Einstein 252,09	100 Fm Ferm 257,10	101 Md Mendelew 258,10	102 No Nobel 259,10	103 Lr Lawrans 262,11		
			LREE		HREE													



Rys.6. Pierwiastki ziem rzadkich [opracowanie własne]

Lantanowce są w stanie tworzyć fazy międzymetaliczne z innymi pierwiastkami (aluminium, bor, żelazo, czy kobalt). Właściwości magnetyczne pierwiastków ziem rzadkich wynikają z ich budowy elektronowej, mianowicie niecałkowicie wypełnionej podgrupy 4f, powodującej wystąpienie zarówno orbitalnego, jak również spinowego momentu magnetycznego. Wypadkowy kierunek namagnesowania w tych fazach jest równoległy do jednego kierunku w sieci krystalicznej. Oddziaływania pomiędzy poszczególnymi elektronami w lantanowcach są bardzo słabe, powodując niską temperaturę Curie. Ich fazy z metalami przejściowymi uzyskują właściwości magnetyczne. W związku z czym nowoczesne magnesy opierają swoją budowę na lantanowcach (neodym, samar, prazeodym) oraz pierwiastkach przejściowych (żelazo, kobalt), które pozwalają na uzyskanie dużego namagnesowania. Strukturę materiału można modyfikować, wprowadzając atomy międzywęzłowe (bor, węgiel, azot) [48,49].

Pierwsze magnesy zawierające w składzie pierwiastki ziem rzadkich powstały w 1966r. W 1983 r. za sprawą Sumitomo Special Metals (Japonia) oraz General Motors (USA) wynaleziono nowy materiał magnetyczny $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Japończycy do tego celu wykorzystali

metodę metalurgii proszków, natomiast w USA zastosowano szybkie chłodzenie metalu z fazy ciekłej. Obecność neodymu zapewnia wysokie namagnesowanie nasycenia, prowadzące do wysokiej remanencji oraz gęstości energii. W związku z czym nastąpił rozwój badań nad trójskładnikowym układem równowagi Nd-Fe-B. W badaniach wyznaczono występowanie trzech układów trójskładnikowych $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (Φ) $\text{Nd}_{1-\epsilon}\text{Fe}_4\text{B}_4$ (η) $\text{Nd}_5\text{Fe}_2\text{B}_6$ (ρ) oraz wielu faz dwuskładnikowych. Stopy na magnesy posiadają skład chemiczny zbliżony do Φ , z pewnym nadmiarem neodymu. Struktura fazowa magnesów złożona jest z twardej magnetycznej fazy Φ , niewielkiej ilości paramagnetycznej η oraz drugiej paramagnetycznej fazy, zawierającej około 95% neodymu. Ostatnia z faz kształtuje właściwości magnetyczne, natomiast jej cienka warstwa, rozmieszczona na granicy ziaren fazy Φ umożliwia wzajemne oddziaływania magnetyczne [37,49].

Produkcja magnesów neodymowych jest procesem skomplikowanym, który wykorzystuje różne technologie w różnych etapach produkcyjnych. Podstawowe etapy produkcyjne obejmują:

- Wydobycie surowca – podstawowymi surowcami do produkcji magnesów neodymowych jest neodym, dysproz, prazeodym, terb, żelazo i bor. Neodym zazwyczaj pozyskiwany jest z monacytu (minerał), żelazo z rudy żelaza, natomiast bor najczęściej pochodzi z boraksu (minerał).
- Przygotowanie surowców – etap ten obejmuje rozdzielanie i oczyszczanie neodymu oraz przygotowanie składników stopu. Neodym wyodrębniany jest z minerału z wykorzystaniem procesów chemicznych, takich jak ekstrakcja organiczna czy wymiana jonowa. Następnie procesy obejmują przygotowanie składników magnesów do utworzenia stopów z zachowaniem odpowiednich proporcji oraz właściwości magnetycznych.
- Produkcja stopu - składniki są poddawane procesowi wytapiania, w wyniku którego powstaje ciekły stop magnetyczny.
- Magnesowanie – uzyskany stop neodymu poddawany jest magnesowaniu w silnym polu magnetycznym, celem uzyskania trwałego namagnesowania.
- Obróbka - namagnesowane produkty poddawane są kształtowaniu (szlifowanie, powlekanie itd.), uzyskując ostateczny kształt i właściwości.
- Kontrola jakości – kontrola obejmująca wszystkie etapy produkcyjne pod względem spełnienia określonych norm [50,51].

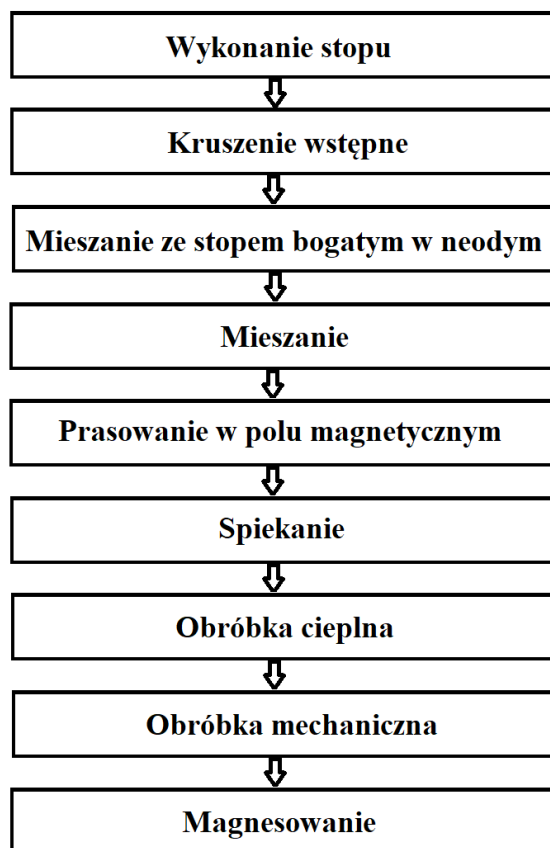
Produkcja magnesów neodymowych prowadzona jest wieloma metodami, dwie podstawowe metody to spiekanie i szybkie chłodzenie ze stanu ciekłego [47,50].

2.1. Wytwarzanie magnesów Nd – Fe – B metodą metalurgii proszków

Metalurgia proszków jest powszechnie stosowaną techniką produkcji magnesów neodymowych. Na poprawność procesu wpływają następujące wymagania:

- synteza faz, posiadających dobre właściwości magnetyczne,
- wytworzenie mikrostruktur o dużej korelacji,
- nadanie obrabianemu materiałowi funkcjonalnej postaci [38,50].

W tej metodzie spiekanie magnesów najczęściej realizowane jest w procesie spiekania z udziałem fazy ciekłej. Pierwszym etapem procesu wytwarzania magnesów jest wykonanie stopu o żądanym składzie chemicznym (Rys.7) [50].



Rys.7. Schemat wytwarzania spiekanych magnesów neodymowych
[opracowanie własne na podstawie 50]

Wykonany stop jest kruszony, najczęściej metodą rozdrabniania wodorem (ma to związek z dużą twardością stopu neodymowego). Proces prowadzony jest w temperaturze pokojowej i ciśnieniu atmosferycznym, poprzez nasycenie wlewków gazowym H_2 . Istotą procesu jest zjawisko dużego wzrostu objętości materiału, wynikającego z absorpcji wodoru.

Rozdrobniony materiał następnie zostaje zmielony, uzyskując uziarnienia poniżej $3\ \mu m$. Mielenie ma decydujący wpływ na jakość wyprodukowanego magnesu. Proces realizowany jest w atmosferze ochronnej (cykloheksan lub toluen), wynika to z szybkości utleniania oraz charakterystyki powierzchni proszku. Celem procesu jest uzyskanie monokrystalicznego proszku, umożliwiającego łatwe namagnesowanie w polu magnetycznym.

W procesie prasowania proszku w polu magnetycznym, uzyskuje się tzw. wyprasek o anizotropowych właściwościach magnetycznych.

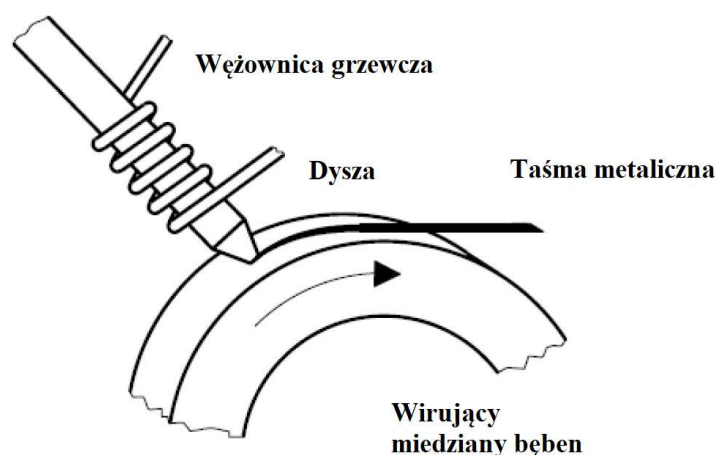
Spiekanie i obróbka cieplna powodują uzyskanie wysokiej gęstości teoretycznej (90 do 99%) oraz pożądanej mikrostruktury (oparta na fazie $Nd_2Fe_{14}B$). Ziarna tej fazy otoczone są warstwą paramagnetyczną, bogatą w neodym. Spiekanie prowadzone jest w atmosferze ochronnej lub próżni i temperaturze około $1100^\circ C$. Obróbka cieplna może być jednostopniowa

(stała temperatura 600°C) lub dwustopniowa (w temperaturze 600°C i 900°C). W efekcie obróbki cieplej następuje rozpuszczenie magnetycznej fazy miękkiej.

Końcowym etapem jest poddanie magnesów obróbce mechanicznej oraz magnesowania w wysokim polu magnetycznym [50,51].

2.2. Wytwarzanie magnesów Nd – Fe – B metodą szybkiego chłodzenia ze stanu ciekłego

Metoda szybkiego chłodzenia ze stanu ciekłego w metodzie metalurgii proszków, charakteryzuje się możliwością uzyskania mniejszego ziarna w materiale (ok. 50 nm). Stosowana jest do uzyskania lepszych właściwości magnetycznych oraz mikrostrukturalnych. Proces polega na natryskiwaniu stopu w formie ciekłej na szybko wirujący miedziany bęben (Rys. 8). Otrzymana metaliczna taśma jest mielona na polikrystaliczny proszek [50].



Rys.8. Wytwarzanie taśmy metalicznej w metodzie szybkiego chłodzenia ze stanu ciekłego
[opracowanie własne na podstawie 50]

Wytworzony proszek może zostać zmieszany z tworzywem sztucznym (w proporcjach 80% metalu i 20% polimeru), następnie sprasowany, wyciśnięty (lub wtrysnięty), w celu uzyskania izotropowych magnesów związanych tworzywem.

Proszek może również być prasowany na gorąco w temperaturze 750°C. Magnesy powstałe w ten sposób charakteryzują się izotropowymi właściwościami magnetycznymi oraz wysoką remanencją [50].

2.3. Recykling magnesów neodymowych

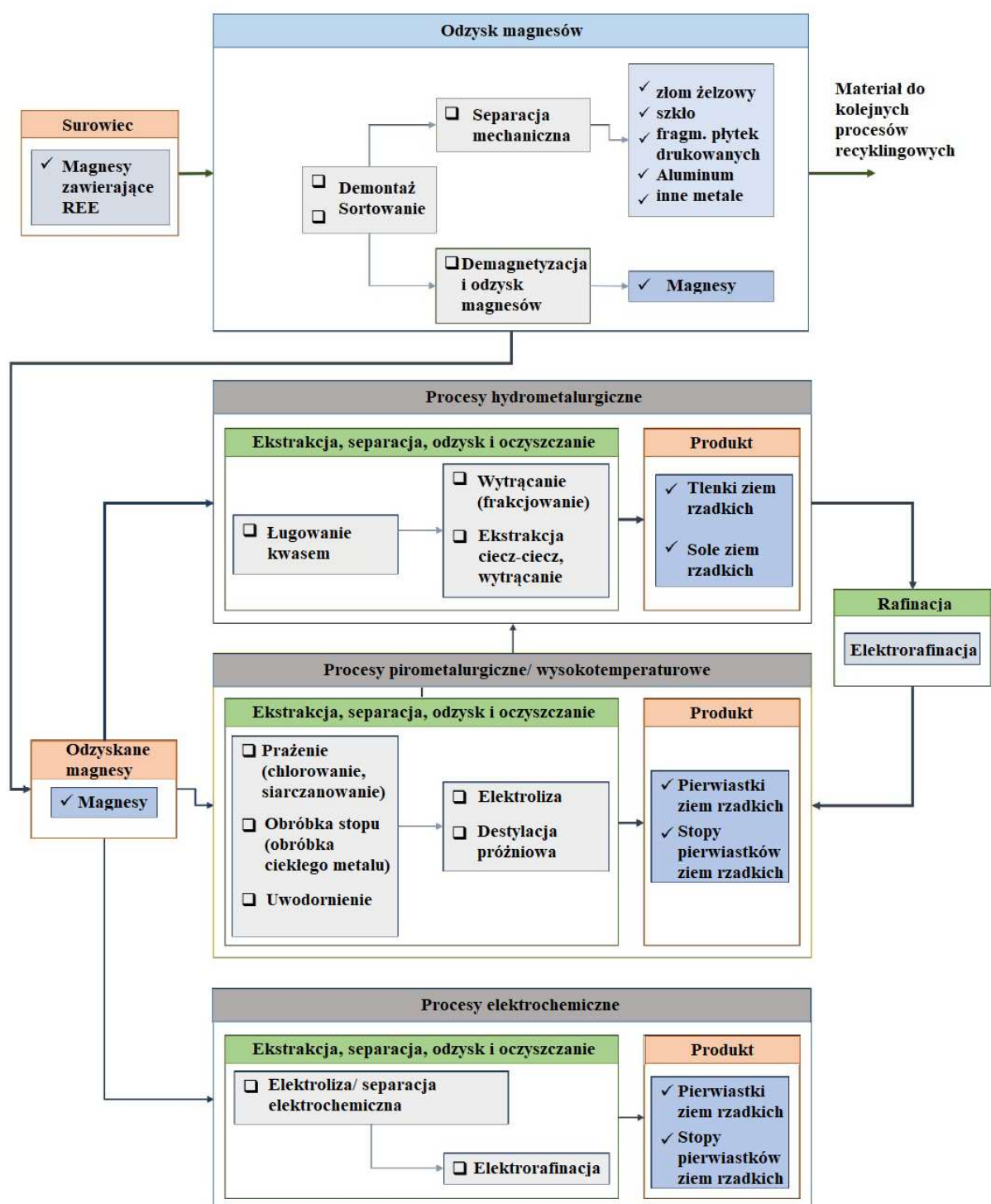
W perspektywie krótkoterminowej, najłatwiejszym sposobem ograniczenia wzrostu popytu na REE jest zwiększenie podaży. Wzrost podaży jest możliwy poprzez eksploatację nowych górniczych źródeł REE, jak również poprzez recykling odpadów zawierających pierwiastki ziem rzadkich. Recykling jest szczególnie istotny dla Europy, która ma niewielkie zasoby naturalne na swoim terytorium, a działalność górnicza podlega ostrym debatom publicznym. Obecne wskaźniki recyklingu dla pierwiastków ziem rzadkich wynoszą jedynie około 1% [48,51].

Recykling magnesów neodymowych, a w szczególności zawartych w nich pierwiastków ziem rzadkich może być ekonomicznie uzasadniony. Jednym z przykładów projektów, których celem było opracowania wydajnej i uzasadnionej ekonomicznie metody recyklingu REE do produkcji magnesów, był projekt REE4EU. W efekcie projektu opracowano pilotażową linię umożliwiającą recykling 2 ton odpadów zawierających REE. W oparciu o technologię REE4EU wykazano, że magnesy wyprodukowane z materiału pochodzącego z recyklingu posiadają takie same właściwości magnetyczne, jak magnesy z surowca pierwotnego [37,52].

Istnieje kilka możliwości ponownego zastosowania zdemontowanych magnesów NdFeB, z wyeksploatowanego urządzenia. Magnesy można ponownie wykorzystać w innym urządzeniu, przetworzyć na stopy ziem rzadkich lub przeprowadzić remanufacturing (odświeżenie) generatora wykorzystującego tego typu magnesy.

Ponowne wykorzystanie jest możliwe w związku z żywotnością magnesów, która wynosi do 300 lat (kilkukrotnie dłuższa od żywotności generatora turbiny wiatrowej). Problemem są cykliczne innowacje technologiczno-konstrukcyjne, mogące uniemożliwić ponowne wykorzystanie magnesów. Najczęściej napędy turbin nie są zaprojektowane pod kątem demontażu, a same magnesy są przyklejone do innych komponentów. Bezpieczne wyjęcie magnesów wiąże się z ich zdemagnesowaniem, mogącym obniżyć ich właściwości magnetyczne. Z tego względu obecnie produkowane turbiny projektowane są z uwzględnieniem poprawy możliwości ich demontażu [44,51].

Obecnie największy udział w recyklingu REE, wynika z procesów produkcyjnych (cięcia) magnesów NdFeB. Proces recyklingu magnesów trwałych można podzielić na dwa etapy: odzyskanie magnezu (odzyskanie magnezu z produktu, w którym się znajduje) oraz odzyskanie REE z magnezu (REE są oddzielane od reszty magnezu) (Rys.9) [51].



Rys.9. Etapy recyklingu magnesów NdFeB [opracowanie własne na podstawie 51]

Etap odzysku magnesów

Głównym etapem odzysku magnesów jest demontaż oraz sortowanie (ręczne lub zautomatyzowane) oraz demagnetyzacja i odzysk zanieczyszczeń magnetycznych. Procesy mają na celu wydzielenie magnesów od pozostałych materiałów, przy jednoczesnym zastosowaniu procesów wydzielających i klasyfikujących inne materiały. W alternatywnej metodzie produkt zostaje rozdrobniony, a następnie poddany separacji magnetycznej

i elektrostatycznej, przesiewaniu i trawieniu chemicznemu. Wykorzystując procesy uwodornienia, wodór pod ciśnieniem atmosferycznym uzyskujemy z magnesów NdFeB zdemagnesowany proszek. Proszek może zostać ponownie ukształtowany w magnes, poprzez spiekanie lub wiązanie żywicą. Stosując bezpośrednie nagrzewanie plazmowe, uzyskuje się magnesy w wyniku ich spiekania lub klejenia. Tego typu produkty poddane recyklingowi, charakteryzują się niższymi właściwościami magnetycznymi [51,52].

Etap odzyskiwania REE z magnesów

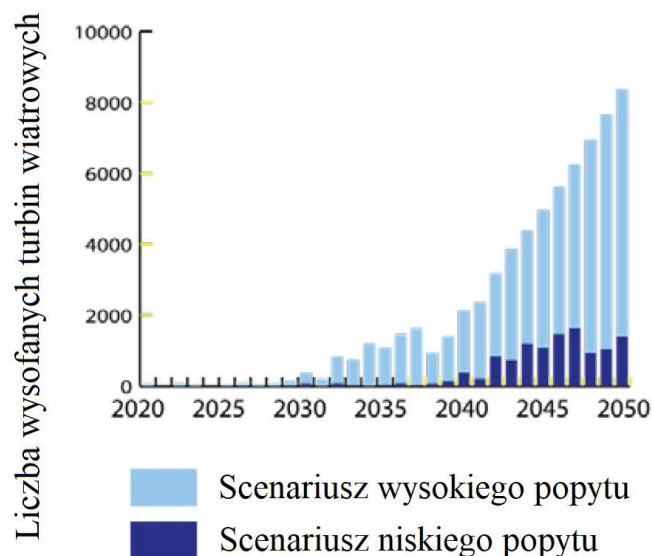
Pierwiastki ziem rzadkich z odzyskanych magnesów można wydzielić wykorzystując procesy hydrometalurgiczne, pirometalurgiczne/wysokotemperaturowe lub elektrochemiczne. W praktyce procesy odzysku REE obejmują połączenie różnych metod.

Hydrometalurgia jest powszechnie stosowana przy przetwarzaniu REE ze źródła pierwotnego, ale znajduje również zastosowanie przy ich recyklingu. W pierwszym kroku materiał jest ługowany kwasem, celem rozpuszczenia magnesów. Rozdzielenie REE z magnesów, następuje poprzez wytrącanie, ekstrakcję ciecz-ciecz, wytrącanie jonowe oraz selektywne wytrącanie. W efekcie procesów hydrometalurgicznych otrzymuje się tlenki i sole ziem rzadkich. Uzyskane związki stanowią produkt handlowy, który można poddać elektrorafinacji otrzymując stopy ziem rzadkich.

Pirometalurgia znajduje zastosowanie przy przetwarzaniu pierwotnych REE oraz przy recyklingu tych pierwiastków. Podstawą procesu jest podwyższona temperatura, umożliwiającą wydzielenie i koncentrację REE z magnesów. Głównymi procesami w tej metodzie są: prażenie oraz obróbka stopu (topienie). Prażenie ułatwia oddzielenie REE z magnesów, natomiast topienie umożliwia wydzielenie tych pierwiastków w formie stopionego metalu; soli; lub roztworu tlenkowego (po stopieniu żużla).

Proces elektrochemicznego odzyskiwania REE z magnesów jest stosunkowo nowoczesną metodą. Wykorzystywane do tego celu są procesy elektrolizy, selektywne elektrochemiczne ługowanie oraz elektrochemiczne utlenianie połączone z wytrącaniem [51,52].

Na podstawie trendów, udało się oszacować liczbę turbin wiatrowych, które zostaną wycofane z użytkowania i mogą zostać przeznaczone do recyklingu. Obecnie produkowane turbiny wiatrowe wykorzystujące generatory z magnesami NdFeB osiągną koniec życia w latach 40tych XXI wieku (Rys.10) [37,52].



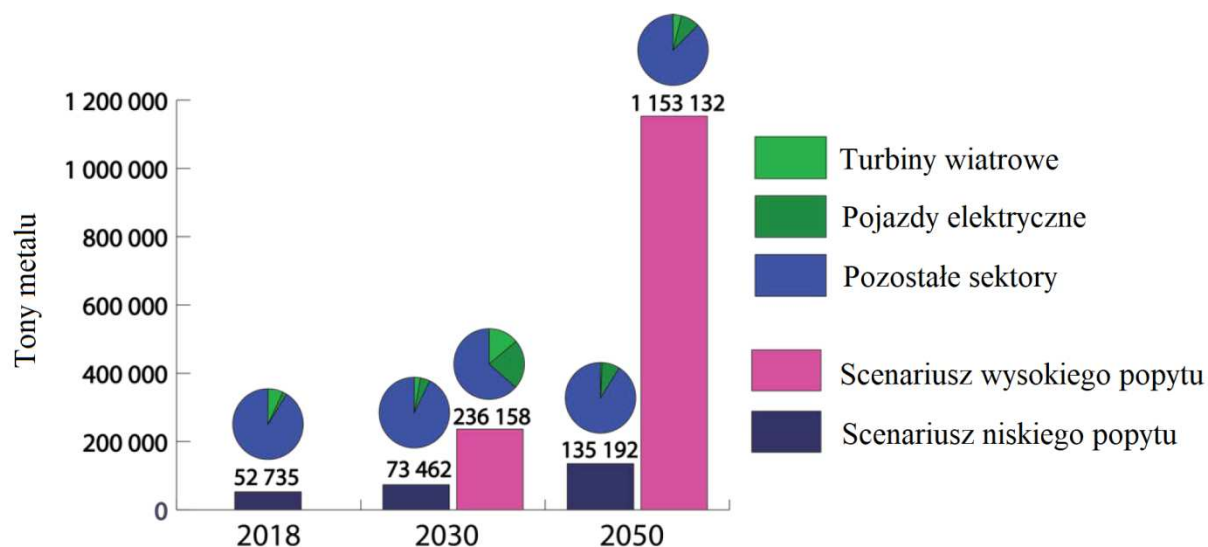
Rys.10. Liczba turbin wiatrowych z generatorem magnesu trwałego osiagających koniec życia każdego roku do 2050 roku [opracowanie własne na podstawie 37]

W dłuższej perspektywie czasu recykling może dostarczyć około jedną trzecią zapotrzebowania na REE dla technologii czystej energii (turbiny wiatrowe i pojazdy elektryczne). Będzie to możliwe w długim okresie czasu i tylko przy znaczącym ulepszeniu systemu recyklingu. Jeżeli obecny wskaźnik recyklingu neodymu (poniżej 1%) i dysprozu (poniżej 5%) nie ulegnie znaczącej poprawie, to potencjalne źródło REE zostanie niewykorzystane [37,52].

2.4. Szacunkowe perspektywy popytu oraz podaży REE wykorzystywanych do produkcji magnesów neodymowych

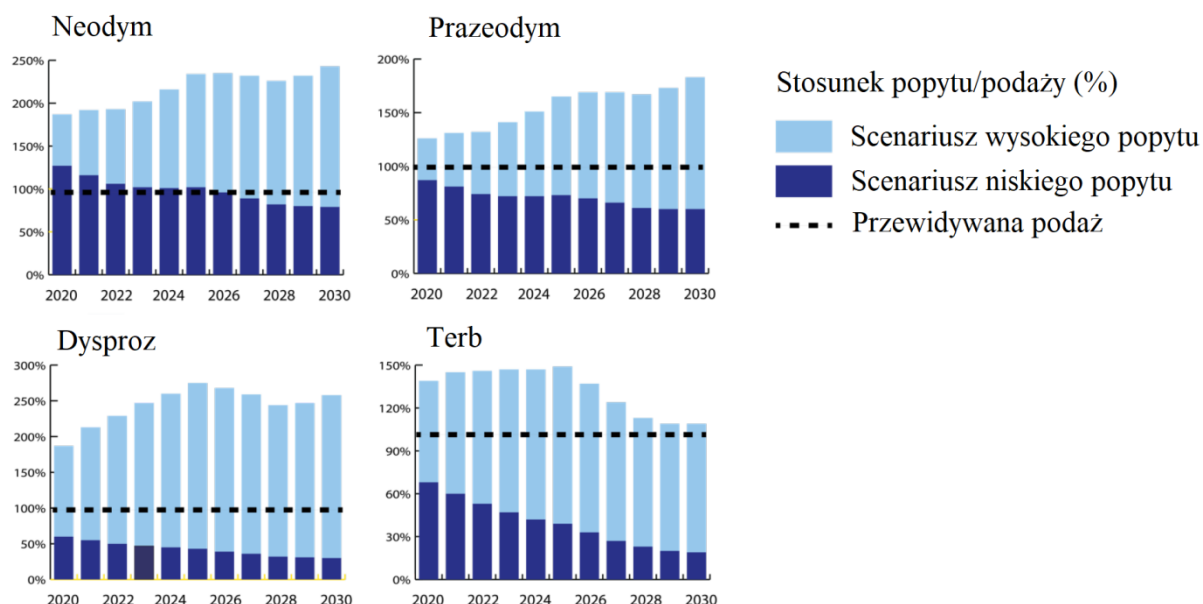
Obecnie pierwiastki ziem rzadkich wykorzystywane do produkcji magnesów neodymowych dostarczane są przez ChRL. Wydobycie, procesy klasyfikacji oraz rafinacji tlenków ziem rzadkich są niemal wyłącznie prowadzone w Chinach. Unijne złoża REE skoncentrowane są wyłącznie w Grenlandii i Szwecji (pewnym potencjałem dysponują Bałkany) są kontrolowane przez australijskie i kanadyjskie firmy. Brak dostępu do tych surowców będzie skutkować negatywnym wpływem na gospodarkę europejską oraz planami dotyczącymi zielonej transformacji [37,48].

Przewiduje się, że zapotrzebowanie w takie pierwiastki jak neodym, prazeodym, dysproz czy terb, wzrośnie zarówno w technologiach niskowęglowych, jak i innych zastosowaniach. Przyszłe zapotrzebowanie związane z turbinami wiatrowymi, elektromobilnością, elektroniką, wynikać będzie z postępu technologicznego, optymalizacji wykorzystywanych materiałów oraz wpływów dynamiki rynkowej (Rys.11) [37].



Rys.11. Szacunkowe zapotrzebowanie na wybrane REE do generatorów turbin wiatrowych, silników pojazdów elektrycznych i innych sektorów, według scenariuszy niskiego i wysokiego zapotrzebowania [opracowanie własne na podstawie 37]

Scenariusz niskiego popytu jest spójny z celami Porozumienia Paryskiego, zakładającymi ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, w ramach którego przewiduje się, że dostępna podaż metali będzie wystarczająca, aby zaspokoić zapotrzebowanie. Scenariusz wysokiego popytu zakłada pełną dekarbonizację Unii Europejskiej do 2050 r. oraz wykorzystywanie wyłącznie odnawialnych źródeł energii. W tym scenariuszu popyt znacząco przewyższy podaż, w szczególności dotyczy to neodymu (Rys.12) [37].



Rys.12. Stosunek popytu/podaży neodymu, prazeodymu, dysprozu i terbu według scenariuszy niskiego i wysokiego zapotrzebowania [opracowanie własne na podstawie 37]

2.5. Wpływ recyklingu magnezów NdFeB na środowisko naturalne

Wydobycie i przetwarzanie magnezów neodymowych, znacząco oddziałuje na środowisko naturalne. Analizując wpływ środowiskowy recyklingu magnezów, należy wziąć pod uwagę następujące czynniki:

- Energia – recykling magnezów wiąże się ze zużyciem dużej ilości energii, która związana jest zarówno ze zbieraniem i separacją odpadów, jak i samym procesem odzyskiwania surowca. W zależności od metody recyklingu oraz wykorzystywanego źródła energii, zużycie energii może znacząco wpływać na środowisko naturalne.
- Substancje chemiczne – w procesach hydrometalurgicznych wykorzystywane są różne substancje chemiczne do rozpuszczania oraz separacji poszczególnych składników magnezów. Prawidłowa utylizacja substancji chemicznych jest kluczowa dla uniknięcia negatywnego wpływu na środowisko naturalne.
- Odpady – procesy związane z recyklingiem magnezów, generują pewną ilość odpadów. Dobór odpowiedniej metody pozwala na ograniczenie ilości odpadów lub rodzaju odpadów, a tym samym minimalizuje ich negatywny wpływ.
- Transport – zbieranie oraz transport magnezów do zakładu prowadzącego recykling, jak również transport odzyskanego produktu, generują emisje gazów cieplarnianych oraz inne wpływy środowiskowe.
- Zużycie wody – pewne procesy recyklingowe wymagają zużycia znaczącej ilości wody. W regionach zmagających się z niedoborem wody, stanowi to dodatkowe wyzwanie środowiskowe.
- Emisja gazów cieplarnianych – energia, która wykorzystywana jest w procesach recyklingu, pochodzi z paliw kopalnych, generuje emisję gazów cieplarnianych. Takie procesy mają bezpośredni wpływ na zmiany klimatyczne.
- Skala produkcji – wpływ środowiskowy jest zróżnicowany w zależności od skali produkcji. Recykling realizowany na małą skalę, wymaga pewnych dostosowań, w przypadku zwiększenia produkcji. Zmiana wiążąca się ze zwiększeniem produkcji magnezów, może mieć wpływ na środowisko [53,54].

Recykling magnezów NdFeB może być prowadzony metodami wykorzystującymi ługowanie kwasem, bądź metodami pirometalurgicznymi. Bardziej przyjazna środowisku jest metoda recyklingu magnezów, wykorzystująca procesy pirometalurgiczne. W metodzie wykorzystującej ługowanie kwasem problem wynika z liczby operacji pośrednich. Część procesów, opartych na procesach hydrometalurgicznych, wytwarza bardzo dużą ilość odpadów produkcyjnych. Zastosowanie metod pirometalurgicznych, eliminuje negatywny wpływ środowiskowy tego typu produktów. Wynika to z ograniczonej ilości operacji pośrednich stopu, będącego bazą do produkcji magnezów [53,55].

3. Metody wyznaczania śladu węglowego

Wzrost świadomości społeczeństwa w temacie oddziaływania przemysłu na środowisko naturalne, przyczynia się do zrównoważonego rozwoju pomiędzy produkcją, a dbałością o środowisko. Obecnie trwająca transformacja zakłada przede wszystkim zmniejszenie wartości śladu węglowego, jak również wydajniejsze zarządzanie odpadami przez firmy [55,56].

Zrozumienie wpływu środowiskowego magnesów NdFeB, wymaga przeprowadzenia oceny cyklu życia (Life Cycle Assessment - LCA). Ocena uwzględnia wszystkie etapy produkcji magnesów, począwszy od wydobycia pierwiastków ziem rzadkich, do momentu ich wycofania z eksploatacji. Ocena LCA umożliwia również, wyznaczenie możliwych ulepszeń zmniejszających szkodliwość środowiskową w danym kroku. Zmniejszenie szkodliwości w jednym z etapów życia, przekłada się na cały okres użytkowania magnesów neodymowych [57,58].

Modelem produkcji i konsumpcji, polegającym na ponownym użyciu i recyklingu produktu, wykorzystując dany produkt tak długo jak jest to możliwe, jest gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ). Celem GOZ jest zmniejszenie ilości odpadów, optymalne wykorzystanie zasobów, minimalizacja wpływu na środowisko i zrównoważony rozwój [59].

Zarówno ocena cyklu życia produktu oraz gospodarka o obiegu zamkniętym to dwa podejścia mające na celu zwiększenie zrównoważenia ekologicznego oraz ograniczenie wpływu działalności ludzkiej na środowisko. Ocena LCA służy jako narzędzie analityczne w przemyśle, pomagające firmom identyfikować obszary, w których mogą poprawić swoje produkty i procesy produkcyjne. GOZ wpływa na podejście społeczeństwa do gospodarki, zmieniając schematy konsumpcji i produkcji na szczeblu społecznym oraz przemysłowym. Obie koncepcje wspierają globalne dążenia do osiągnięcia bardziej zrównoważonych praktyk gospodarczych [58,59].

Z perspektywy niniejszej pracy, istotną kwestią jest również emisja gazów cieplarnianych, związanych z produkcją oraz recyklingiem podzespołów generatora turbiny wiatrowej, z naciskiem na procesy związane z magnesami neodymowymi. Magnesy neodymowe generują wysoką wartość śladu węglowego przede wszystkim na etapie wydobycia i produkcji. Ocena wpływu magnesów na środowisku pozwoli na zminimalizowanie wysokiej wartości śladu węglowego poprzez podjęcie odpowiednich kroków w przyszłości [55,56].

3.1. Normy prawne związane z poruszaną tematyką

Przykładem inicjatywy politycznej, która zmienia europejskie prawo klimatyczne, jest Europejski zielony ład. Głównym celem Europejskiego Zielonego Ładu, jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku. Program obejmuje szereg działań w obszarze ochrony środowiska, zrównoważonej gospodarki, zielonych technologii, efektywności energetycznej oraz transformacji sektorów przemysłowych. Kluczowym elementem jest redukcja emisji gazów cieplarnianych, wspieranie odnawialnych źródeł energii, poprawa efektywności energetycznej budynków oraz promowanie zrównoważonej mobilności. Postanowienia Europejskiego Zielonego Ładu poprzez pakiet „Gotowi na 55”, ma przełożyć ambicje klimatyczne na konkretne przepisy. Przepisy te obejmują następujące postanowienia [58–60]:

- W dniach 10–11 grudnia 2020 roku Rada Europejska zatwierdziła ograniczenie w UE emisji netto gazów cieplarnianych do roku 2030 o co najmniej 55% w porównaniu do roku 1990.
- W grudniu 2022 r. Rada i Parlament Europejski osiągnęły wstępne porozumienie w sprawie przepisów uprawniających do emisji w sektorze lotnictwa.
- Unijni ministrowie środowiska, w czerwcu 2022 r uzgodnili utworzenie Społecznego Funduszu Klimatycznego. Zadaniem Społecznego Funduszu Klimatycznego jest koordynacja społecznych i dystrybucyjnych skutków powstałych przez nowy system handlu uprawnieniami do emisji w budownictwie oraz transporcie drogowym.
- 15 marca 2022 r. Rada wypracowała porozumienie w sprawie granicznego podatku węglowego (CBAM). Zastępuje on istniejące mechanizmy związane z ryzykiem ucieczki emisji, a przede wszystkim przydziałem bezpłatnych uprawnień w handlu emisjami.
- W listopadzie 2022 r. Rada ds. Środowiska przyjęła rozporządzenie o użytkowaniu gruntów, zmianie użytkowania gruntów i leśnictwie, zobowiązując do redukcji emisji oraz większego pochłaniania gazów w tych sektorach.
- W marcu 2023 r. Rada ds. Środowiska przyjęła również rozporządzenie przewidujące redukcje emisji dla samochodów osobowych i dostawczych na 2030 r. i później oraz 100-procentową redukcję od 2035 r. dla nowych pojazdów tego typu.
- W listopadzie 2023 r. Rada oraz Parlament Europejski wstępnie porozumiały się w sprawie ograniczenia emisji metanu o 30% do 2030 r. w porównaniu z poziomem z 2020 r.
- Unijni ministrowie energii przyjęli w październiku 2023 r. nowelizację dyrektywy o odnawialnych źródłach energii, której celem jest podniesienie z 32% do co najmniej 40% udziałów odnawialnych źródeł energii do 2030 r.

Wprowadzenie w życie wytycznych związanych z ograniczeniem śladu węglowego, zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym oraz z zakresu LCA związane jest m.in. z następującymi normami oraz przepisami prawa polskiego oraz unijnego [58,60,61]:

- PN-EN ISO 14040:2009 - Zarządzanie środowiskowe - Ocena cyklu życia - Zasady i struktura
- PN-EN ISO 14044:2009 - Zarządzanie środowiskowe - Ocena cyklu życia - Wymagania i wytyczne
- PN-EN ISO 14064 -1:2019 Gazy cieplarniane -- Część 1: Specyfikacja i wytyczne kwantyfikowania oraz raportowania emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych na poziomie organizacji
- PN-EN ISO 14067:2018-10 - Gazy cieplarniane - Ślad węglowy wyrobów - Wymagania i wytyczne dotyczące kwantyfikacji
- GHG Protocol Product Standard - standard służący do pomiaru i zarządzania śladem węglowym produktów.
- PAS 2050:2011 - wymagania dotyczące oceny emisji gazów cieplarnianych związanych z cyklem życia towarów i usług.

- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 maja 2013 r. w sprawie mechanizmu monitorowania i sprawozdawczości w zakresie emisji gazów cieplarnianych oraz zgłaszania innych informacji na poziomie krajowym i unijnym, mających znaczenie dla zmiany klimatu, oraz uchylające decyzję nr 280/2004/WE.
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Tj. Dz.U. 2024 poz. 54)
- Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Tj. Dz.U. 2023 poz. 1436)
- Dyrektywa 2006/21/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 marca 2006 r. w sprawie gospodarowania odpadami pochodzącymi z przemysłu wydobywczego
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2023/1791 z dnia 13 września 2023 r. w sprawie efektywności energetycznej oraz zmieniająca rozporządzenie (UE) 2023/955
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/19/UE z dnia 4 lipca 2012 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE) (wersja przekształcona), Dz.U. L 197 z 24.7.2012
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy, Dz.U. UE L z 2008 r. Nr 312
- Dyrektywa 94/62/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 grudnia 1994 r. w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych, Dz.U. L 365 z 31.12.1994
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/842 z dnia 30 maja 2018 r. w sprawie wiążących rocznych redukcji emisji gazów cieplarnianych przez państwa członkowskie od 2021 r. do 2030 r. przyczyniających się do działań na rzecz klimatu w celu wywiązania się z zobowiązań wynikających z Porozumienia paryskiego oraz zmieniające rozporządzenie (UE) nr 525/2013
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/841 z dnia 30 maja 2018 r. w sprawie włączenia emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w wyniku działalności związanej z użytkowaniem gruntów, zmianą użytkowania gruntów i leśnictwem do ram polityki klimatyczno-energetycznej do roku 2030 i zmieniające rozporządzenie (UE) nr 525/2013 oraz decyzję nr 529/2013/UE

Zielona energia, w tym energia pozyskiwana z turbin wiatrowych, odgrywa kluczową rolę w strategii zrównoważonego rozwoju, zwłaszcza w kontekście Europejskiego Zielonego Ładu. Turbiny wiatrowe stanowią jeden z elementów transformacji energetycznej, mającej na celu zredukowanie emisji gazów cieplarnianych i przyspieszenie przejścia na odnawialne źródła energii. Istotną kwestią jest weryfikacja czy korzyści płynące z ich eksploatacji w postaci czystej energii, przewyższają negatywne aspekty związane z ich cyklem życia (począwszy od wydobycia surowców do utylizacji/recyklingu). Narzędziem wykorzystywanym do oceny wpływu danego elementu na zmiany klimatyczne jest wartość śladu węglowego.

3.2. Ślad węglowy

Z inicjatywy nie tylko rządów, ale również organizacji pozarządowych, przedstawicieli przemysłu oraz biznesu, podejmuje się inicjatywy mające na celu redukcję emisji gazów cieplarnianych (GHG). Działania z tym związane, obejmują ciągły monitoring, raportowanie, weryfikowanie oraz prognozowanie skutków zmian klimatycznych. W związku z czym, utworzono parametr ślad węglowy (ang. carbon footprint - CF). Ślad węglowy to miara całkowitej emisji gazów cieplarnianych, powstałych na wszystkich etapach istnienia produktu, usługi lub działalności, przeliczona na ekwiwalent dwutlenku węgla (CO_{2e}). Wartość ta wyrażana jest w postaci ekwiwalentu ditlenku węgla na jednostkę funkcjonalną produktu (CO_{2eq}/jedn. funkcjonalna). Ślad węglowy może być oceniany w kontekście zarówno pełnej analizy cyklu życia (cradle to grave) jak i niepełnej analizy cyklu życia (cradle to gate) [62,63].

Obecnie w Polsce nie istnieje prawny obowiązek obliczania śladu węglowego. Mimo to, coraz więcej firm oczekuje od swoich partnerów biznesowych przedstawienia informacji na temat śladu węglowego przedsiębiorstwa oraz oferowanych produktów. Jednym z powodów jest również możliwość raportowania do CDP (Carbon Disclosure Project) – globalnego systemu zbierania i ujawniania danych dotyczących wpływu na środowisko, skierowanego do inwestorów, firm oraz samorządów [62,64].

Najprawdopodobniej w perspektywie kilkuletniej, obliczanie wartości śladu węglowego dla produktów stanie się obowiązkowe. Potwierdzają to wprowadzane zmiany za sprawą nowych dyrektyw UE. Obowiązującą normą prawną, dotyczącą obliczania wartości śladu węglowego jest Porozumienie Paryskie z 12 grudnia 2015 r [62–64].

W grudniu 2022 roku przyjęto Dyrektywę CSRD zobowiązującą do corocznych raportów niefinansowych, począwszy od 2025 roku (raport za 2024 rok), dla różnorodnej grupy firm. W zakresie tych raportów jednym z kluczowych elementów będzie ujawnianie informacji dotyczących wartości śladu węglowego przedsiębiorstwa. Raport za 2024 rok, opublikowany w 2025 roku, będzie obejmować firmy, które do tej pory były zobowiązane zgodnie z dyrektywą NFRD. Od 2026 roku (raport za 2025 rok), to zobowiązanie zostanie poszerzone o duże przedsiębiorstwa (zatrudniające co najmniej 250 pracowników i osiągające roczny obrót przekraczający 50 milionów euro lub posiadające roczną sumę bilansową przekraczającą 43 miliony euro). Kolejny etap nastąpi w 2027 roku (raport za 2026 rok), kiedy obowiązek ten będzie dodatkowo rozszerzony na małe i średnie przedsiębiorstwa notowane na giełdzie oraz inne instytucje finansowe. Przygotowywanie raportów będzie oparte na standardach ESRS (European Sustainability Reporting Standards), to standardy raportowania zrównoważonego rozwoju, które obecnie są w fazie tworzenia, a dotychczas opublikowano jedynie ich projekty [62,63].

Ślad węglowy, który można obliczać zarówno dla organizacji, jak i dla produktu, oblicza się na podstawie norm, które określają zasady tych obliczeń. Najczęściej stosowane wytyczne pochodzą ze specyfikacji PAS 2050, normy ISO oraz Protokołu GHG. W tych normach znajdują się kluczowe instrukcje dotyczące obliczania śladu węglowego oraz określone ścieżki wyboru kategorii, dla których przeprowadzane są obliczenia [63,64].

3.2.1. Publicly Available Specification 2050

Specyfikacja Publicly Available Specification 2050 (PAS 2050), została opracowana przez British Standards Institute (BSI) na bazie współpracy oraz konsultacji branżowych. Specyfikacja PAS 2050 jest odpowiedzią na potrzeby znalezienia spójnej metody obliczania emisji gazów cieplarnianych dla cyklu życia produktów oraz usług. Intencją, przyświecającą autorom specyfikacji, było stworzenie jednolitej metody określania emisji konkretnych produktów. Umożliwia ona pomiar wpływu działalności, produktów lub usług firmy na środowisko oraz pomiar emisji gazów cieplarnianych podczas ich cyklu życia. Firma wykorzystująca tę specyfikację zobowiązuje się do zredukowania emisji w cyklu życia produktu, na podstawie tzw. Product Related Emissions Reduction Framework [65].

PAS 2050 opiera się przede wszystkim na już istniejących, następujących normach [65]:

- ISO 14040 - Zarządzanie środowiskowe; Ocena cyklu życia; Zasady i struktura.
- ISO 14044 - Zarządzanie środowiskowe; Ocena cyklu życia; Wymagania i Wytyczne.

3.2.2. Standard ISO 14067

Norma ISO 14067 jest metodą obliczania śladu węglowego, która została opublikowana w 2018r. Norma została opracowana przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną, zrzeszającą krajowe organizacje normalizacyjne. Zawiera wymagania oraz wytyczne dotyczące określania wartości śladu węglowego danego produktu oraz jawność uzyskiwanych wyników obliczeń. W odróżnieniu PAS 2050, norma ta została opracowana przez reprezentantów różnych krajów świata, a tym samym posiada status międzynarodowy. Powstanie normy wynikało z konieczności wyznaczenia jasnych i jednolitych zasad dotyczących określania oraz publikowania wartości śladu węglowego. Norma prezentuje wytyczne dotyczące raportowania oraz powszechnego udostępniania wyników obliczeń [66,67].

Norma ISO 14067 bazuje na innych normach. W zakresie określania wartości śladu węglowego opiera się tak jak w przypadku specyfikacji PAS 2050, na ISO 14040 i ISO 14044 (opis metodyki oceny cyklu życia produktu). W obszarze komunikowania wyników obliczeń opiera się na ISO 14020 i ISO 14024 (ogólne zasady etykietowania i deklaracji środowiskowych) [66,67].

3.2.3. Greenhouse Gas Protocol

Protokół Gazów Cieplarnianych (Greenhouse Gas Protocol) jest jednym z najważniejszych narzędzi stosowanych do obliczania wartości śladu węglowego produktów, usług czy organizacji. Protokół ten opracowany został przez WRI (World Resources Institute) oraz WBCSD (World Business Council for Sustainable Development). Emisje gazów cieplarnianych obliczane zgodnie z protokołem GHG, składają się z trzech zakresów, które obejmują:

- Zakres 1 - obejmuje emisje bezpośrednio pochodzące ze spalania paliw, które są własnością przedsiębiorstwa, bądź są przez nie nadzorowane oraz emisje z prowadzonych procesów technologicznych,

- Zakres 2 - obejmuje emisje pośrednie (energetyczne), powstałe w wyniku wytwarzania energii elektrycznej, energii cieplnej, które przedsiębiorstwo importuje.
- Zakres 3 - najbardziej złożony, obejmujący emisje pośrednie, będące poza kontrolą organizacji, ale uwzględniające cały łańcuch wartości [68].

Greenhouse Gas Protocol, jako standard do obliczania wartości śladu węglowego, ma kilka kluczowych zalet względem innych metod. Jest globalnie uznawanym standardem, co sprawia, że jest szeroko stosowany oraz akceptowany na różnych poziomach. Nie obejmuje tylko produktów czy organizacji, ale także sektory projektów redukcji emisji, co sprawia, że jest wszechstronny. Ponadto uwzględnia różnorodne kategorie gazów cieplarnianych, umożliwiając kompleksową analizę. Jest też zgodny z innymi międzynarodowymi standardami, ułatwiając organizacjom korzystanie z różnych narzędzi w zarządzaniu zrównoważonym rozwojem [68,69].

GHG Protocol korzysta z doświadczenia ekspertów, co wpływa na jego wysoką jakość i wiarygodność. W rezultacie, stanowi często preferowany wybór w dziedzinie oceny śladu węglowego [68,69].

3.2.4. Ślad węglowy w branży wydobywczej

Badania nad zmianą klimatu wprowadzają nowe wymagania w przemyśle i biznesie, motywując firmy do ograniczania wpływu środowiskowego, zwłaszcza w branży wydobywczej. Obliczanie wartości śladu węglowego stało się powszechne w dużych przedsiębiorstwach, umożliwiając skuteczne zarządzanie efektywnością energetyczną i redukcją emisji gazów cieplarnianych [62].

Analizy związane ze śladem węglowym opracowywane są m.in. przez takich światowych producentów miedzi jak: Codelco, Glencore Xstrata, Freeport-McMoRan, BHP Billiton, czy Grupo Mexico. Przedsiębiorstwa te prowadzą raporty z badań śladu węglowego, wprowadzając informacje dotyczące podjętej metodyki (własne metodyki, Greenhouse Gas Emission Protocol, ISO14064, itp.) oraz sposobów przeciwdziałania. Duże przedsiębiorstwa z branży wydobywczej mają również na uwadze, iż działania związane z monitorowaniem i redukcją emisji gazów cieplarnianych, są bezpośrednio związane z prawami do emisji lub obowiązkiem uiszczania za nie kar. Konieczność monitorowania emisji zanieczyszczeń, jest dodatkowo uzasadniona poszukiwaniem źródeł poprawy efektywności energetycznej. Jest to możliwe poprzez eliminację procesów, które związane są z powstawaniem największych emisji [62,70].

Tego typu przedsiębiorstwa obowiązkowo od 2016 roku muszą obliczać oraz raportować emisje związane z bezpośrednim spalaniem paliw oraz zużyciem energii lub ciepła. Od 2021 roku dodatkowo muszą obliczać oraz raportować emisji wywołane przez inne rodzaje działalności, np. podróże służbowe, zakupy [70].

Ślad węglowy jest zatem istotnym narzędziem w kontekście współczesnych wysiłków na rzecz zrównoważonego rozwoju i walki ze zmianami klimatycznymi. W związku z powyższym, warto monitorować zmiany w przepisach oraz standardach dotyczących ujawniania wartości śladu węglowego i dostosować się do nowych wymagań. Przedsiębiorstwa, które są proaktywne w kwestiach zrównoważonego rozwoju, mogą być lepiej przygotowane do zmian w regulacjach oraz zyskać przewagę nad konkurencją.

III. Część badawcza

W tym rozdziale, na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej, opisana została część badawcza pracy obejmująca:

- Opracowaną ocenę cyklu życia generatora,
- Metodykę demontażu turbin wiatrowych,
- Opracowaną metodykę demontażu generatora turbiny,
- Obliczenia wartości śladu węglowego dla przyjętego scenariusza cyklu życia generatora turbiny wiatrowej,
- Analizę wrażliwości wynikającą z wybranego środka transportu dla wybranej trasy na wartość śladu węglowego,
- Obliczenia wartości śladu węglowego związane z recyklingiem poszczególnych grup materiałowych generatora.

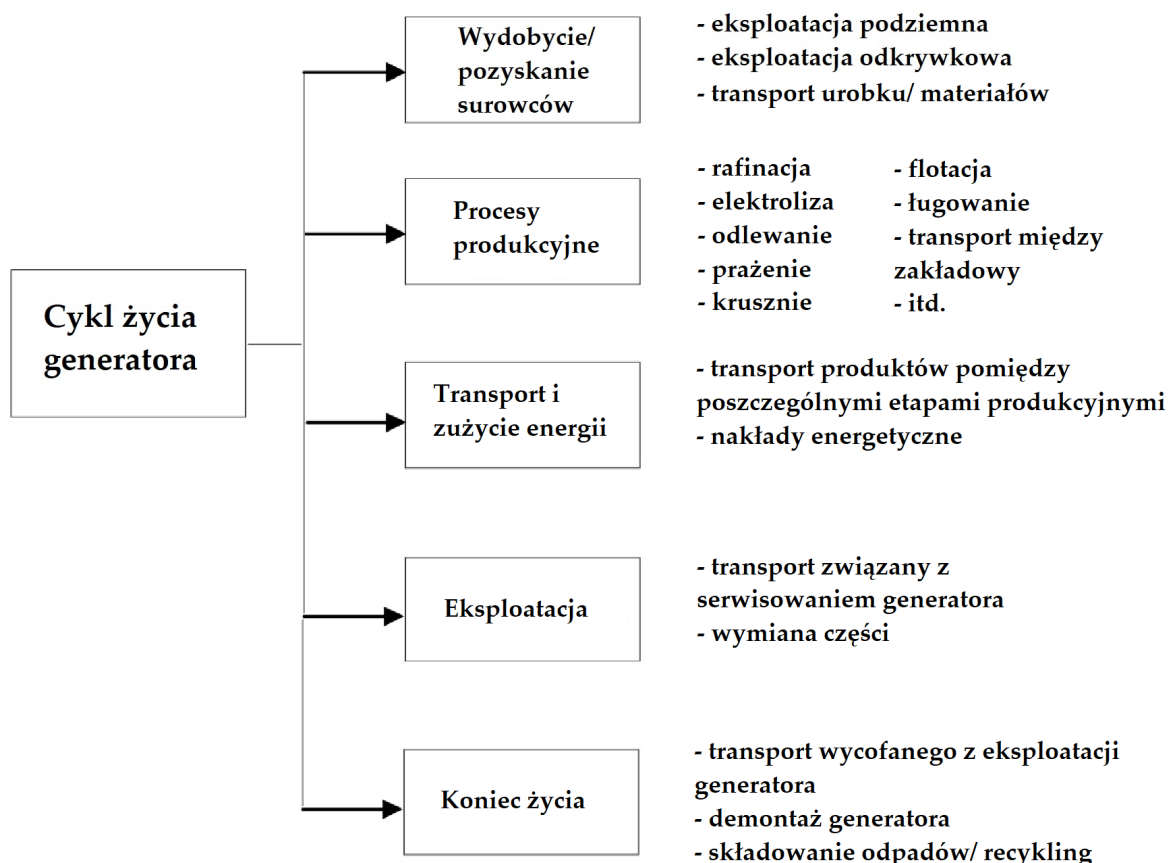
Opracowane analizy bazują na opracowanych scenariuszach cyklu życia generatora oraz na danych literaturowych i informacji uzyskanych z przedsiębiorstwa KOMEL.

4. Ocena cyklu życia generatora

Ocena cyklu życia generatora została opracowana na podstawie współpracy z firmą KOMEL (z której pozyskano generator) oraz wytycznych następujących norm międzynarodowych [58,71]:

- EN ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe - Ocena cyklu życia - Zasady i struktura.
- EN ISO 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe - Ocena cyklu życia - Wymagania i wytyczne.

Ocenę dotyczącą aspektów środowiskowych oraz wpływu środowiskowego generatora, rozpatrywano „od kołyski aż po grób”. Wzięto pod uwagę etapy związane z wydobyciem/pozyskaniem surowców, procesami produkcyjnymi, transportem surowców/materiałów i nakładem energetycznym, eksploatacją oraz końcem życia (Rys.13).



Rys.13. Etapy wzięte pod uwagę w ocenie życia generatora [opracowanie własne]

LCA podzielono na cztery fazy:

- określenie celu i zakresu.
- analiza zbioru wejść i wyjść.
- ocena wpływu.
- interpretacja wyników.

4.1. Określenie celu i zakresu

Pierwszym krokiem LCA jest precyzyjne określenie celu i zakresu badania, które osiągnięto poprzez dogłębną analizę oraz zrozumienie całego cyklu życia produktu. Ocena cyklu życia generatora ma na celu wyznaczenie wartości śladu węglowego. Priorytetem jest wytypowanie metody obejmującej całościowy cykl życia generatora, ograniczającej szkodliwe oddziaływanie na ludzkie zdrowie i środowisko, poprzez ograniczenie wartości śladu węglowego [58,71].

W tym celu ocenie poddano procesy produkcyjne generatora PMzg132-8B firmy KOMEL, z jednoczesnym uwzględnieniem zapotrzebowania na media i materiały. Przyjętą jednostką funkcjonalną jest masa (wyrażona w kg) poszczególnych podzespołów wchodzących w skład generatora. Obliczony ślad węglowy jest wyrażony jako ekwiwalent dwutlenku węgla na jednostkę funkcjonalną ($\text{CO}_2\text{eq/jedn. funkcjonalna}$). Opracowany cykl życia generatora, a konkretnie wartość śladu węglowego, zostanie porównany z cyklem życia w którym wykorzystane zostaną magnesy NdFeB z recyklingu (pomijając tym samym szkodliwe procesy

związane z wydobyciem oraz część procesów produkcyjnych). Przeprowadzono również porównanie obejmujący pełny recykling wszystkich podzespołów generatora.

Zgodnie z celem opracowania zakres granic analizowanego systemu obejmuje procesy i emisję związane z wydobyciem, produkcją, transportem oraz emisjami z tym związane montażem, eksploatacją i końcem użytkowania generatora. Poza granicami znalazły się źródła znikomych emisji wartości śladu węglowego, jak np. emisje związane z operacjami transportowymi na małą odległość lub zużycie energii w procesach administracyjnych, które mają znikomy wpływ na całkowity bilans emisji związanych z cyklem życia generatora.

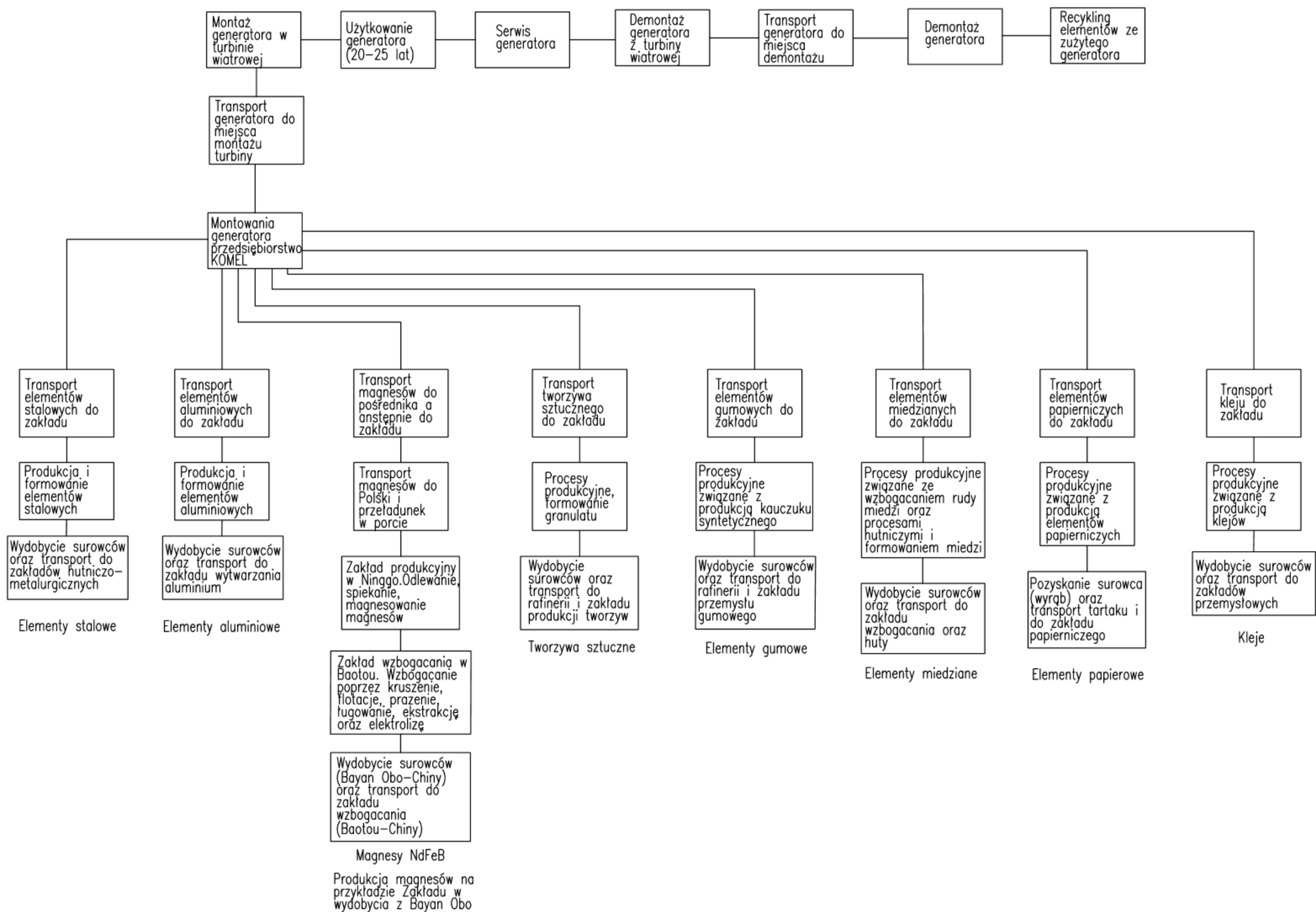
Na podstawie wiedzy przedsiębiorstwa KOMEL oraz analizy literaturowej z zakresu elementów wchodzących w skład generatora, starano się odzwierciedlić stan faktyczny dla pochodzenia, procesów produkcyjnych oraz łańcuchów dostaw tych elementów. W przypadku magnesów neodymowych, ze względu na brak wiedzy przedsiębiorstwa KOMEL na temat ich pochodzenia, procesami produkcyjnymi oraz łańcuchem dostaw, bazowano na wiedzy literaturowej oraz przyjętych scenariuszach cyklu życia. W założeniu opracowano najkorzystniejszą z ekonomicznego i środowiskowo punktu widzenia technologię produkcyjną magnesów. Scenariusz zakłada wydobycie i produkcję magnesów w ChRL, ich transport do Polski drogą morską oraz dystrybucję w Polsce z wykorzystaniem transportu drogowego.

Zakres geograficzny zrealizowanej analizy kształtuje się od krajowego do globalnego. Część danych ma charakter krajowy (np. pozyskanie surowców takich jak stal oraz miedź), natomiast inne dane mają charakter globalny (np. pozyskanie surowców oraz procesy produkcyjne związane z magnesami NdFeB). W tabeli 2 zaprezentowano zakresy obejmujące analizę cyklu życia generatora.

Tabela 2. Zakresy obejmujące analizę cyklu życia generatora [opracowanie własne]

Lp.	Zakres	Produkcja oraz eksploatacja generatora
1.	Szerokość zakresu	„od kołyski aż pod grub”
2.	Głębokość systemu	maksymalnie do 2 poziomu
3.	Zakres czasowy	25 lat
4.	Zakres czasowy danych	do 5 lat
5.	Zakres geograficzny	krajowy do globalnego
6.	Zakres technologiczny	nowoczesne technologie

Na podstawie określonego celu i zakresu, opracowano schemat cyklu życia generatora (Rys. 14). Po przeprowadzeniu demontażu generatora, pozwalającego na określenie masowego udziału poszczególnych składowych generatora, posłużył jako podstawę do obliczeń wartości śladu węglowego LCA generatora.



Rys.14. Schemat cyklu życia generatora [opracowanie własne]

4.2. Dane wejściowe i wyjściowe

Drugim krokiem analizy LCA jest zebranie oraz ilościowe określenie wejść i wyjść dla generatora w całym jego cyklu życia. Przyjęty model wejść i wyjść, składa się z pewnych operacji technologicznych. Operację te reprezentują dane materiałowo-energetyczne, dotyczące nakładów surowcowych i energii wykorzystanej do produkcji i transportu generatora. Dane wejściowe obejmowały materiały i energia, natomiast dane wyjściowe produkty główne, odpady oraz emisje zanieczyszczeń (Tabela 3) [58,71].

Tabela 3. Dane wejściowe i wyjściowe dla LCA generatora [opracowanie własne]

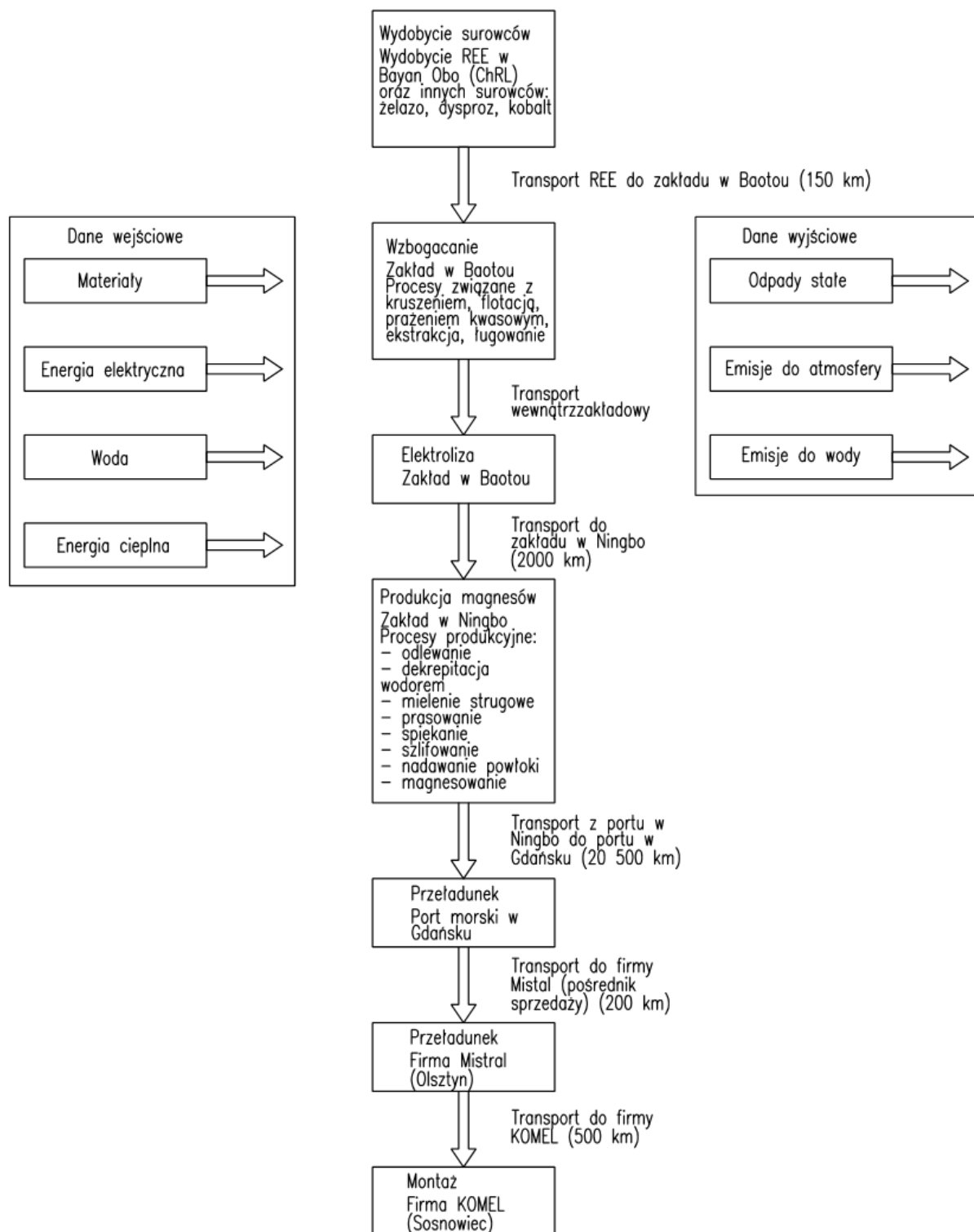
Dane wejściowe	
Surowce	Surowce w postaci: rudy żelaza, węgla kamiennego, gazu ziemnego, boksytu, ropy naftowej itd.
Zużycie paliw	Zużycie paliwa wynikające z transportu zakładowego, lokalnego, krajowego oraz globalnego
Zużycie energii elektrycznej i ciepłej	Zużycie energii elektrycznej i ciepłej do prowadzenia procesów wydobywczych oraz produkcyjnych, m.in. topienia metali oraz do obróbki cieplnej, takiej jak hartowanie, wyżarzanie czy spiekanie.
Dane wyjściowe	
Produkty główne	Główne gotowe produkty składowe generatora (magnesy NdFeB, stojan, uzwojenie, pokrywy, osłony itd.
Dane wyjściowe (odpady i emisje)	
Odpady stałe	Odpady powstałe w procesach wydobywczych oraz produkcyjnych takie jak skały i piaski (nie zawierające wartościowych minerałów), szlaki, pyły, żużle, odpady chemiczne itd.
Emisje do powietrza	Emisje związane m.in. z gazami cieplarnianymi: CH ₄ , CO ₂ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆ , NF ₃ (fluorowane gazy cieplarniane, itd
Emisje do wody	Emisje do wody wynikające z procesów wydobywczych i produkcyjnych, uwalniające zanieczyszczeń w postaci metali ciężkich czy związków siarki, kwasy, sole, itd.

Stosowane normy dopuszczają korzystanie z danych literaturowych oraz dostępnych baz danych.

W przypadku elementów stalowych, wykorzystywanych do produkcji generatora, została wykorzystana ogólnodostępna baza danych Ecoinvent 3.3. Uzyskane dane opierały się na wartościach wejść i wyjść z globalnej produkcji koksu, spieku, pelletu i surówki. Dane dotyczące węgla hutniczego na podstawie światowych statystyk IEA oraz informacji z bazy GaBi. Inne dane dotyczące wydobywania opierały się na bazie danych GaBi, w tym dane dotyczące energii elektrycznej dla danego kraju i regionalne źródła energii wydobywczej. Powyższe dane pozwoliły na obliczenie wartości śladu węglowego, wykorzystując do tego celu oprogramowanie SimaPro. Dla następujących elementów generatora, również bazowano na danych z Ecoinvent 3.3. oraz wykorzystano oprogramowanie SimaPro do przyszłych obliczeń wartości śladu węglowego [72–74]:

- Elementy aluminiowe - dane dotyczące produkcji aluminium - stop do obróbki plastycznej, obejmujący w swoim obszarze rynek globalnym. Obejmują wszelkie procesy związane z eksploatacją surowców, wszelkimi procesami produkcyjnymi, kończąc się dostawą aluminium do konsumenta tego produktu. Transport między poszczególnymi etapami został również uwzględniony.
- Elementy z tworzywa sztucznego – dane opracowano na podstawie polimetakrylanu metylu. To produkt z tworzywa sztucznego pochodzenia kopalnego, nie ulega biodegradacji i jest materiałem termoplastycznym. Produkt składa się w 100% z pierwotnego materiału, bez zawartości materiałów pochodzących z recyklingu. Dane dotyczące produkcji tworzywa sztucznego, obejmują w swoim obszarze rynek globalnym. Dane obejmują procesy produkcyjne oraz transport materiału do konsumenta.
- Elementy miedziane – dane zawierające scenariusz transport metalu pierwotnego do Europy. Moduł odzwierciedla pochodzenie i udział metalu wtórnego na przykładzie procesów realizowanych na terenie Niemiec. Przeznaczony jest do stosowania metalu w różnych zastosowaniach technicznych, takich jak stopy i materiały konstrukcyjne. Procesy technologiczne uwzględniają i rozróżniają procesy pizolityczne i hydrolityczne. Dane obejmują procesy produkcyjne oraz transport materiału do konsumenta.
- Elementy gumowe – dane bazujące na kauczuku syntetycznym w skali globalnej. Uwzględniają one procesy produkcyjne oraz transport do konsumenta.
- Elementy papierowe - Ten zbiór danych reprezentuje europejski rynek papieru powlekanego. Dane obejmują procesy produkcyjne oraz transport materiału do konsumenta. Zawiera szacunki dotyczące średnich wymagań transportowych od podmiotu produkującego do podmiotu użytkującego. Odległości transportowe obliczono na podstawie statystyk transportowych Eurostatu.
- Kleje - Dane dotyczące produkcji kleju, obejmują w swoim obszarze rynek globalnym. Dane obejmują procesy produkcyjne oraz transport materiału do konsumenta.

Tak jak opisano powyżej, w przypadku magnesów neodymowych bazowano na wiedzy literaturowej dotyczącej procesów związanych z eksploatacją, produkcją, natomiast wiedzę z zakresu sieci dystrybucji uzupełniła firma KOMEL. Na tej podstawie, opracowano schemat LCA magnesów neodymowych, poczynwszy od ich wydobycia do montażu do firmie KOMEL (Rys.15).



Rys.15. LCA magnesów neodymowych począwszy od wydobywania surowca do montażu w generatorze [opracowanie własne]

4.3. Ocena wpływu cyklu życia

Ten etap ma na celu ocenę wpływu cyklu życia (LCIA) generatora, w tym wszystkich wejść i wyjść, na środowisko. Dobór odpowiedniej kategorii wpływu, wskaźników tej kategorii oraz modele charakteryzowania stanowią składowe LCIA. Elementy dobrowolne obejmują normalizowanie, grupowanie, ważenie oraz analizę jakości danych. W ramach przyjętego systemu analizy wybrano metodę Greenhouse Gas Protocol V1.03 / CO₂ eq (kg), korzystając z programu Sima Pro. W metodzie tej wyróżniamy 4 kategorie wpływu [58,68,71]:

- Fossil CO₂ eq (kopalny CO₂ – emisja CO₂ związana z działalnością przemysłową)
- Biogenic CO₂ eq (biogenna emisja CO₂ - emisja CO₂ zależna od naturalnego obiegu węgla)
- CO₂ eq from land transformation (Ekwiwalent CO₂ z przekształcenia gruntów)
- CO₂ uptake (Pochłanianie CO₂)

W przypadku oceny cyklu życia wytworzenie generatora będzie miało największe wpływ na zmiany klimatu. Wiąże się to z emisją gazów cieplarnianych zarówno podczas wydobycia surowców, jak również podczas wytwarzania składowych generatora.

4.4. Interpretacja wyników

Interpretacja wyników jest ostatnią fazą analizy LCA. Głównym celem interpretacji jest przegląd i analiza uzyskanych rezultatów, oraz weryfikacja ich kompletności, spójności i przydatności w kontekście założonego celu i zakresu analizy. Ostatnia faza LCA skupia się na formułowaniu ostatecznych wniosków, wyjaśnieniu ewentualnych ograniczeń, oraz proponowaniu wytycznych mających na celu redukcję skutków środowiskowych [62,68,71].

Wyniki przedstawiane są w formie raportu. Analizując zawarte w raporcie dane, podejmowane są działania mające na celu zminimalizowanie negatywnego wpływu działalności oraz ustalenie najlepszych rozwiązań technologicznych, które przyczynią się do poprawy jakości środowiskowej produktu.

W części badawczej pracy, którą rozpoczęto od cyklu życia generatora, skupiono się na pracach związanych z demontażem generatora oraz obliczeniu wartości śladu węglowego. Metodę demontażu turbin wiatrowych opisano poniżej.

5. Metodyka demontażu turbin wiatrowych

Nie istnieje żaden międzynarodowy standard związany z wycofywaniem z eksploatacji turbin wiatrowych. Istnieją jednak dokumenty, stanowiące pewne wytyczne, dostarczające ogólnych informacji na temat następujących kroków związanych z wycofaniem i demontażem farm wiatrowych. Plan demontażu musi odzwierciedlać krajową, a w niektórych przypadkach regionalną legislację. W przypadku Niemiec wytyczną dotyczącą rozbiórki farm wiatrowych jest norma DIN 18007. Norma pozwala na dobór metod cięcia i separacji, a także etapów załadunku i transportu, wraz z wymaganiami dotyczącymi zdrowia i bezpieczeństwa. Ogólna metodyka oraz wytyczne związane z demontażem turbin wiatrowych, wyglądają następująco [75,76].

Działania związane z likwidacją i demontażem poszczególnych turbin wiatrowych lub całych farm wiatrowych spoczywają na następujących podmiotach [75,76]:

- właściciel turbiny wiatrowej lub całej farmy wiatrowej,
- firma eksploatująca turbinę wiatrową,
- firma demontująca,
- firma zarządzająca odpadami,
- organy administracyjne.

Właściciel turbin wiatrowych ponosi ogólną odpowiedzialność za likwidację oraz demontaż urządzenia. Firma eksploatująca turbinę najczęściej jest odpowiedzialna za planowanie, monitoring oraz utylizację. W przypadku braku dostatecznej wiedzy ze strony firmy eksploatacyjnej, odpowiedzialność za utylizację musi zostać zlecona specjalistycznej firmie. Niemniej jednak pełna odpowiedzialność w dalszym ciągu spoczywa na tej firmie.

Firma demontująca urządzenia jest odpowiedzialna za kategoryzację odpadów, zapewniając tym samym najwyższą jakość recyklingu. Do obowiązków firmy należy [75]:

- Kontrola obecności pisemnych instrukcji demontażu na placu budowy.
- Zapewnienie zgodności z przepisami dotyczącymi zdrowia oraz bezpieczeństwa.
- Kontrola obecności kierownika budowy.
- Kontrola wykonania prac zgodnie z przyjętą technologią oraz zgodnie z zatwierdzonymi dokumentami demontażowymi.

W Niemczech firma związana z gospodarką odpadami, zgodnie z ustawą o zamkniętym obiegu odpadami, jest prawnie określana jako firma specjalistyczna. W zakresie jej działalności wyróżnia się zarządzanie odpadami, polegające na: ponownych wykorzystaniu, recyklingu (odzysku surowców), odzysku energetycznym oraz utylizacji.

Odpowiedzialność organów administracyjnych polega na kontroli, przestrzeganiu przepisów dotyczących stosowanych środków likwidacji odpadów (między innymi dotyczących utylizacji odpadów niebezpiecznych). Ponadto organy mogą żądać przedstawienia dokumentów potwierdzających prawidłowość utylizacji odpadów [75,76].

Przyjętą procedurę demontaż turbiny wiatrowej, należy oprzeć o ocenę następujących parametrów [75]:

- Materiał z którego wykonana jest wieża (betonowa, stalowa, hybrydowa).
- Rodzaj fundamentu (płaski, palowy).
- Lokalizacja turbiny i rzeźba terenu (otwarta przestrzeń, las itp.).
- Harmonogram czasowy.

Demontaż turbiny wiatrowej należy rozpocząć od upewnienia się, że obszar montażowy żurawia i drogi dojazdowe, spełniają wymagania firmy dysponującej żurawiem. Ponadto przed rozpoczęciem instalacji placu budowy, należy spełnić następujące warunki związane ze sprzętem budowlanym [75]:

- Teren demontażu musi zostać zabezpieczony za pomocą ogrodzenia oraz odpowiednio oznakowany,
- Zapewnienie dostępu do wody, możliwość odprowadzenia ścieków i zasilania,
- Zainstalowanie i wyposażenie biur, pomieszczeń sanitarnych oraz pierwszej pomocy,
- Dostęp do sprzętu gaśniczego,
- Budowa dróg ucieczki i ratowniczych,
- Zapewnienie wystarczającego obszaru do obsługi demontażu oraz dla możliwości tymczasowego przechowywania komponentów turbiny,
- Mogą być stawiane również specjalne wymagania np. ze względu na ochronę środowiska (hałas, kurz, drgania).

Poszczególne kroki profesjonalnego demontażu turbina wiatrowej wraz z usunięciem górnej krawędzi fundamentu, obejmują [75]:

1. Odchylenie turbiny do pozycji pozwalającej na manewrowanie wysięgnikiem żurawia.
2. Odpowiednie ustawianie łopatek w odpowiedniej pozycji do demontażu.
3. Całkowite odłączanie zasilania i okablowania.
4. Jeżeli występują, odłączenie magazynu energii od zasilania urządzenia.
5. Montaż dźwigu głównego na placu demontażu.
6. Demontaż wirnika turbiny w całości.
7. Umieszczenie wirnika na podłożu placu demontażu.
8. Demontaż wirnika na poszczególne części: 3 pojedyncze łopaty (najczęściej) oraz piasta.
9. Tymczasowe składowanie poszczególnych łopat i piasty.
10. Cięcie łopat wirnika, celem redukcji rozmiarów (firmy utylizujące łopatki dopuszczają ich maksymalnego dopuszczalnego rozmiaru).
11. Załadunek łopat wirnika na pojazdy ciężarowe.
12. Transport fragmentów łopat do specjalistycznej firmy zajmującej się gospodarką odpadami.
13. Załadunek piasty turbiny na pojazdy ciężarowe.
14. Transport piasty do specjalistycznej firmy zarządzającej tego typu odpadami.
15. Całkowity demontaż gondoli z turbiny (łącznie z zasilaniem) i opuszczanie w całości.
16. Bezpośredni załadunek gondoli na pojazd transportu ponadnormatywnego.

17. Transport gondoli do specjalistycznej firmy zarządzającej odpadami.
18. Demontaż poszczególnych sekcji stalowych wieży i opuszczanie każdej sekcji w całości.
19. Tymczasowe składowanie pojedynczych sekcji wieży na przeznaczonej do tego powierzchni magazynowej oraz zabezpieczenie przed stoczeniem się na bok.
20. Rozdrabnianie sekcji wieży (najczęściej z zastosowaniem palników) do rozmiarów umożliwiających ich transport.
21. Załadunek rozdrobnionych części wieży do kontenerów transportowych i transport do specjalisty firma zajmująca się gospodarką odpadami.
22. Demontaż elementów turbiny, pozostałych w podstawie wieży.
23. Bezpośrednie ładowanie pozostałych komponentów turbiny wiatrowej na samochody ciężarowe.
24. Transport elementów fundamentu do specjalistycznej firmy zajmującej się gospodarką odpadami.

5.1. Cięcie i separacja

Demontaż turbiny wiatrowej wymaga licznych operacji polegających na cięciu materiałów, a następnie ich separacji. Działania związane z cięciem i separacją muszą być prowadzone zgodnie z wymaganiami związanymi ze zdrowiem i bezpieczeństwem.

Jeżeli to możliwe, wszelkie cięcia powinny być realizowane w zamkniętej przestrzeni, minimalizując emisję hałasu oraz kurzu. Najlepszym rozwiązaniem (w porównaniu do techniki ręcznej) jest proces mechanicznego cięcia, który obejmuje wykorzystanie [75]:

- przecinarki strumieniem wodnym,
- piły łańcuchowej,
- przecinarki szczękowej,
- piły tarczowej.

Metoda z zastosowaniem przecinarki strumieniem wody, wykorzystuje do cięcia wodę o bardzo wysokim ciśnieniu lub wodę i mieszaninę substancji ściernych. Istnieje możliwość przecinania m.in. łopat turbiny oraz metali. Metoda jest stosunkowo przyjazna dla środowiska jeżeli chodzi o emisję pyłów i hałasu. Wadą tej metody jest duże zużycie wody w odniesieniu do innych metod [75].

Metoda z zastosowaniem piły łańcuchowej chłodzonej wodą z diamentowymi ząbkami, może przecinać różne materiały turbiny, w tym drewno i metale. Istnieje możliwość cięcia łopat do wymaganego rozmiaru, a długość łańcucha może być dowolnie regulowana. Proces jest przyjazny dla środowiska pod względem emisji pyłów oraz hałasu. Woda wykorzystywana do chłodzenia piły może być poddana recyklingowi, a generowane odpady mogą być zbierane. Ponadto cięcia są stosunkowo gładkie i o pożądanym kształtach. Wadą metody jest jej czasochłonność oraz konieczność solidnego zamocowania elementów turbiny podczas cięcia, aby uniknąć zaciskania (blokowania) łańcucha [75].

Stosowane są również różnego rodzaju oraz rozmiarów piły tarczowe z diamentowymi końcówkami (piły ręczne lub napędzane hydraulicznie, z ostrzami o średnicy do 2 metrów). Piła może wykonać cięcia o dowolnym rozmiarze, ale zazwyczaj konieczne jest wykonanie kilku cięć. Podczas cięć emitowana jest pewna ilość pyłu, którego wydzielanie się do otoczenia można ograniczyć poprzez zastosowanie systemu wychwytywania pyłu (za pomocą odpylacza, jak i wody). Zaletą metody jest możliwość wykonywania cięć we wszystkich kierunkach. Umożliwia to demontaż ciężko dostępnych elementów takich jak laminaty [75].

Wykorzystanie nożyc szczękowych jest najczęściej stosowaną metodą do demontażu łopat turbin. Nożyce napędzane są hydraulicznie, a materiał jest miażdżony w strefie cięcia. Wadą metody jest konieczność zastosowania mgły wodnej, celem ograniczenia emisji pyłów i włókien. Dodatkowym utrudnieniem jest konieczność oczyszczenia obszaru z włókien, po zakończeniu prac. Elementy łopat mają niestety tendencję do emitowania włókien podczas transportu. W związku z czym, zwiększa to potrzebę odpowiedniego zabezpieczenia, samochodu ciężarowego [75].

5.2. Załadunek i transport

Załadunek i transport zdemontowanych elementów turbin wiatrowych najczęściej zlecający jest specjalistycznym firmom zewnętrznym. Firmy te dysponują specjalistycznym sprzętem, jak żurawie, transport drogowy oraz specjalistyczną wiedzę. Ich specjalistyczna wiedza, dotyczy przede wszystkim informacji związanymi z zarządzaniem trasą przewożenia zdemontowanych elementów, wymaganiami dotyczącymi podnoszenia, usług linowych i potrzebnych zezwoleń.

Przed przystąpieniem do realizacji transportu elementów, konieczne jest złożenie specjalnego wniosku o przewóz ciężki (ewentualnie wniosek o transport ponadnormatywny) do lokalnych władz. Wniosek należy złożyć z wyprzedzeniem planowanej operacji, w celu uzyskania zgody w pożądanym terminie. Firmy transportowe muszą być wyznaczone z dużym wyprzedzeniem przed planowaną datą transportu. Umożliwia to opracowanie planu trasy, ocenę ryzyka i plan zarządzania transportem, z odpowiednią rezerwą czasową.

Planowanie i ocena ryzyka muszą być opracowane przez operatora żurawia, logistyków oraz producentów turbin wiatrowych. Zapewnia to wybór najbezpieczniejszej metody podnoszenia i załadunku elementów do transportu. W efekcie udokumentowany w formie planu jest system podnoszenia, zawierający rysunki z poszczególnymi krokami podnoszenia, załadunku i zabezpieczenia komponentów.

W przypadku transportu drogowego, który przekracza normy wagi lub dozwolonych wymiarów, wymaga uczestnictwa pojazdów eskortujących [75].

Nie wszystkie dane niezbędne do demontażu turbiny wiatrowej są łatwe do uzyskania. Dane dotyczące typu turbiny, mocy urządzenia, średnicy wirnika, parametry piasty, typ generatora, materiały eksploatacyjne są łatwe do uzyskania od producentów nowszych modeli turbin. W przypadku starszych modeli turbin, dane dotyczące piasty i materiałów eksploatacyjnych, można uzyskać od firm serwisowych, które przeprowadzały obsługę i konserwację urządzenia [75].

6. Demontaż generatora turbiny wiatrowej

Powyższe wytyczne dotyczące demontażu turbin wiatrowych, nie odnoszą się do demontażu generatora. W związku z czym, jednym z celów niniejszej pracy było opracowanie metodyki demontażu generatora.

Obiektem analiz laboratoryjnych była synchroniczna prądnica trójfazowa napięcia przemiennego, wzbudzana magnesami trwałymi, która w zamiarze zostanie wykorzystana jako generator turbiny wiatrowej. Podstawowe parametry techniczne generatora, zaprezentowano w tabeli 4 [77].

Tabela 4. Podstawowe parametry techniczne generatora [77]

Generator typu PMzg132-8B			
Wartości znamionowe maszyny			
Moc	S_N	9	[kVA]
Napięcie	U_N	400	[V]
Prąd	I_N	14,5	[A]
Współczynnik mocy	$\cos\varphi$	1	[-]
Prędkość obrotowa wirnika	n_N	750	[obr/min]
Częstotliwość przy prędkości n_N	f_N	50	[Hz]
Sprawność	η_N	91	[%]
Stopień ochrony: IP54			
Rodzaj pracy: S1			

Badania laboratoryjne rozpoczęto od opracowania metodologii demontażu poszczególnych części składowych pozyskanego generatora, pozwalającą na wyznaczenie wartości śladu węglowego. Badania realizowano na pozyskanym w pierwszym roku studiów generatorze trójfazowym z magnesami trwałymi, typu PMzg132-8B, firmy KOMEL (Rys.16).



Rys.16. Generator KOMEL - PMzg132-8B [opracowanie własne]

Pozyskany generator z magnesami trwałymi, zwany również generatorem magnesów trwałych (PMG - Permanent Magnet Generator), to rodzaj generatora, wykorzystującego magnesy trwałe do wytwarzania energii elektrycznej.

Podstawową zasadą działania generatora jest zasada indukcji elektromagnetycznej. Kiedy przewód elektryczny przecina linie pola magnetycznego, powstaje siła elektromotoryczna (SEM) w tym przewodzie, co prowadzi do generacji prądu elektrycznego [78].

Generatory z magnesami trwałymi mają wiele zalet, takich jak wysoka sprawność, niskie koszty utrzymania, mniejsze rozmiary i waga w porównaniu do tradycyjnych generatorów. Ponadto, nie wymagają one zewnętrznego źródła energii do generacji pola magnetycznego, co czyni je bardziej niezależnymi i wydajnymi. Generatory tego typu stosowane są w energetyce wiatrowej tj. w turbinach wiatrowych o mocy nieprzekraczającej kilku kilowatów (dla małych turbin wiatrowych przeznaczonych do użytku domowego) [78].

Generator, który został zakupiony w ramach badań do niniejszej pracy jest przeznaczony do użytku domowego. Wybór wynikał z rosnącej popularności turbin wiatrowych wyposażonych w tego typu generatory. Jest to ściśle powiązane z ograniczoną żywotnością takich turbin.

W celu realizacji procesu demontażu, wykonano stanowisko badawcze w laboratorium ITG KOMAG (Zakład BG, w którym jestem zatrudniony). Proces demontażu oparto na procesach mechanicznej oraz termicznej techniki defragmentacji generatora. W związku z występującymi w ciągu procesu demontażu komplikacjami, stanowisko stopniowo wyposażano w niezbędne narzędzia oraz urządzenia.

Metodologia demontażu generatora objęła następujące kroki oraz opisy napotkanych problemów wraz z ich rozwiązaniem:

Przygotowanie planu demontażu:

Etap ten składał się z:

- Opracowania koncepcji kolejności demontażu.
- Przygotowania niezbędnych zasobów oraz sprzętu.

Wykonanie stanowiska pracy:

Etap ten składał się z:

- Przygotowania miejsca dla stanowiska demontażu generatora.
- Zapewnienia niezbędnych środków ochrony osobistej.

Demontaż elementów złącznych generatora:

Etap ten składał się z:

- Demontażu pokryw tarcz łożyskowych i skrzynki zaciskowej.
- Demontażu aluminiowych list z wysuniętego wału, które podtrzymują magnesy NdFeB.

Wysunięcie wału z magnesami:

Etap ten składał się z:

- Prac nad wysunięciem wału z magnesami trwałymi ze stojana generatora, z wykorzystaniem ściągaczy.

W tym kroku napotkano problem związany ze swobodnym wyciągnięciu wału generatora ze stojana generatora. Problem wynikał z siły magnetycznej magnesów trwałych na wale generatora. W celu rozwiązania problemu, zastosowano ściągacze (Rys.17), umożliwiające wysunięcie wału z magnesami trwałymi.



Rys.17. Wysuwanie magnesów trwałych [opracowanie własne]

Demontaż magnesów trwałych:

Etap ten składał się z:

- Demontażu magnesów NdFeB, z wykorzystaniem palnika gazowego.

W tym kroku siła magnetyczna magnesów trwałych nie pozwalała na demontaż magnesów z wału generatora. Po usunięciu aluminiowych listew pozycjonujących magnesy na wale, siła magnetyczna uniemożliwiła ich usunięcie. Do usunięcia magnesów wykorzystano procesy termiczne z zastosowaniem palnika gazowego, obniżając tym samym siłę magnetyczną (Rys.18).



Rys.18. Demontaż magnesów NdFeB
z wykorzystaniem palnika gazowego [opracowanie własne]

Demontaż elementów nierozłącznych generatora oraz demontaż uzwojenia miedzianego:

Etap ten składał się z:

- Demontaż uzwojenia miedzianego z rowków stojana oraz usunięcie papierowego wyłożenia z rowków.
- Usunięcie urządzeniem precyzyjnym laminatu z rowków stojana.

Na tym etapie, konieczne było pozbycie się laminatu z rowków stojana, celem uwolnienia uzwojenia miedzianego – w tym celu wykorzystano urządzenie precyzyjne z wiertłami z końcówką diamentową (Rys.19),



Rys.19. Usuwanie laminatu z rowków stojanach [opracowanie własne]

Segregacja materiałów:

Etap ten składał się z:

- Segregacji poszczególnych grup materiałów
- Określenia bilansu materiałowego elementów wchodzących w skład demontowanego generatora

Dokumentacja:

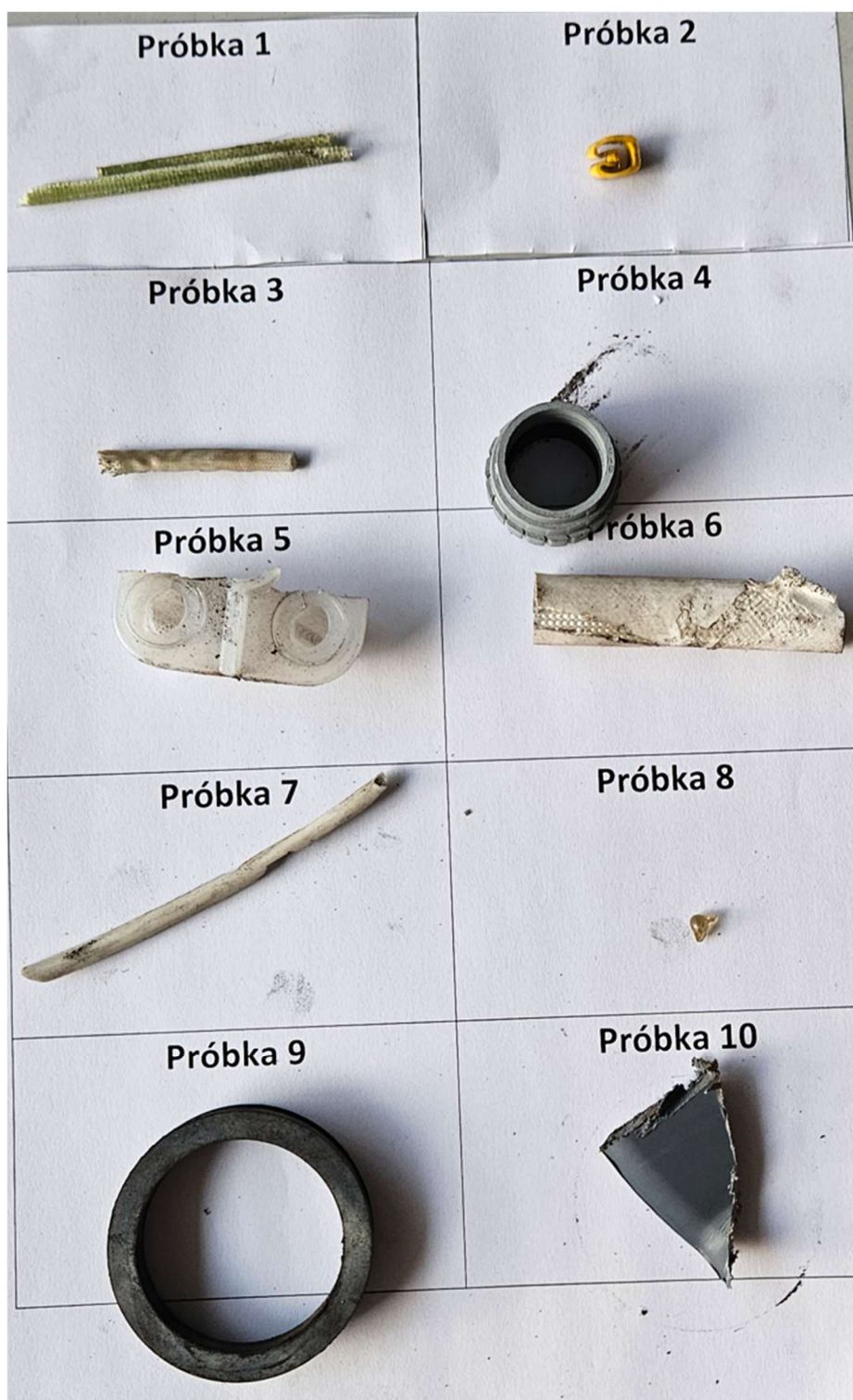
Etap ten składał się z:

- Dokumentowania wszystkich elementów procesu demontażu, w tym ewentualnych problemów lub incydentów (nieprzewidziana konieczność zakupu ściązaczy).

6.1. Badania strukturalne wybranych elementów generatora

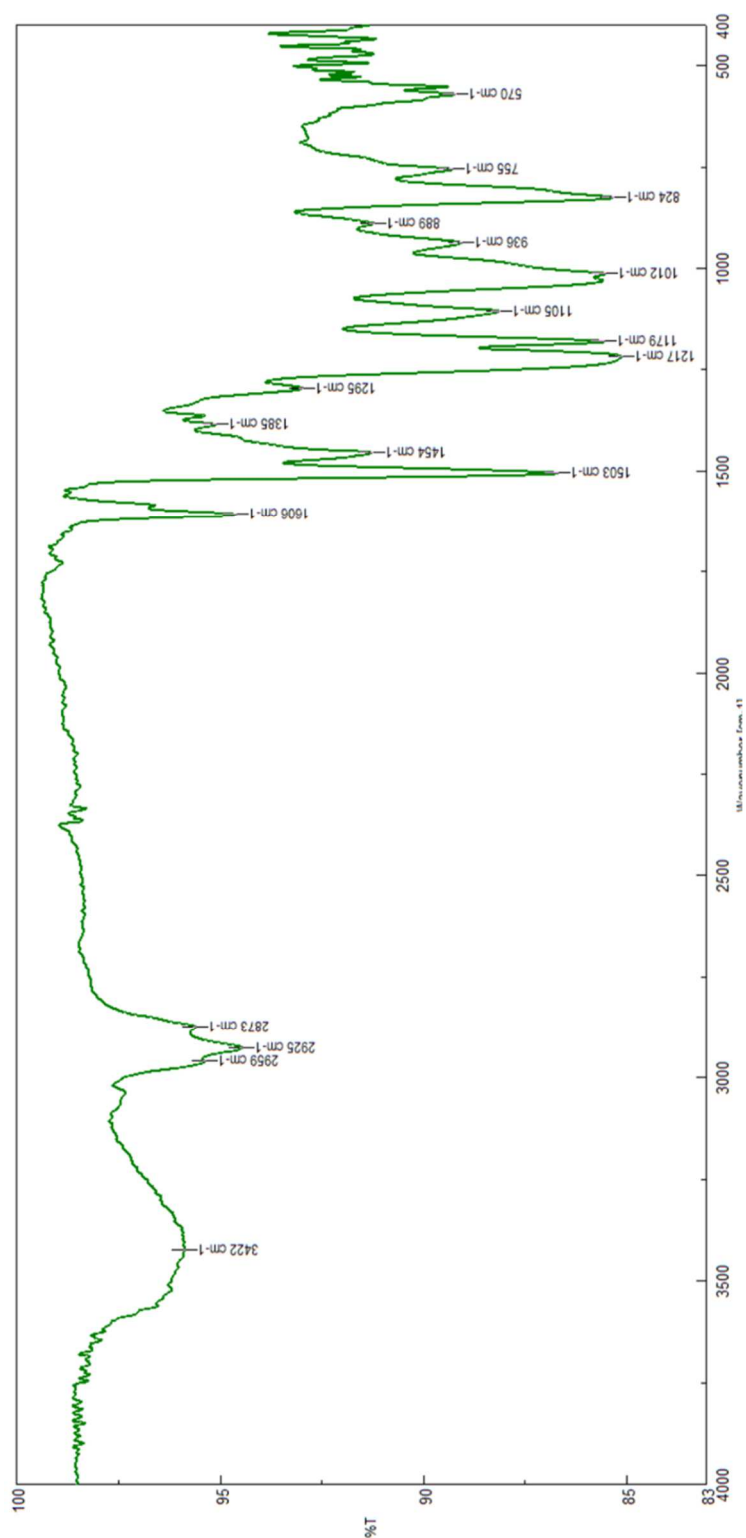
Generator zgodnie z opracowaną metodyką demontażu, został zdekompletowany celem zebrania danych o materiałach i elementach będących składowymi zespołu. Na tej podstawie określono charakterystykę strukturalną oraz ilościową, pozwalającą na obliczenie wartości śladu węglowego.

Dla materiałów o niezidentyfikowanej strukturze (tworzywa sztuczne) przeprowadzono dodatkowe badania strukturalne. Badania wykorzystywały technikę FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - spektroskopia fourierowska w podczerwieni), wykorzystywaną do tego typu materiałów. Analiza przeprowadzona przez Centrum Materiałów Polimerowych i Węglanowych w Zabrze, objęła 10 próbek materiałów (Rys. 20) [79].



Rys.20. Analizowane próbki tworzyw sztucznych [opracowanie własne]

Widma w podczerwieni dostarczonych próbek zarejestrowano przy użyciu Spektrometru FTIR JASCO FT/IR-6700 (JASCO Corporation, Tokio, Japonia), który na potrzeby analizy wyposażono w przystawkę ATR jednodobiciową z kryształem diamentu (ATR PRO670H-S). Jeden pomiar obejmował 32 skany w obszarze $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ i z rozdzielczością 4 cm^{-1} . Z próbek wycinano małe fragmenty, które następnie przenoszono na kryształ ATR i wykonywano pomiary widm IR (Rys.21 - widmo ATR-FTIR dla próbki 1) [79].



Rys.21. Widmo ATR-FTIR - Próbką 1 [79]

Dla każdej próbki wykonano dwa pomiary, mierząc widma IR na dwóch różnych głębokościach. Jedno z widm reprezentuje zewnętrzną warstwę próbki, z kolei drugie – warstwę wewnętrzną [79].

Badania wewnętrznego oraz powierzchniowego widma IR próbek 1, 2, 4, 5, 6, 10 są widmem polipropylenu. W przypadku próbek 3, 7, 9 wykazano widma kauczuku silikonowego. Próbką 8 wykazując widmo zgodne z żywicą epoksydową (typu DGEBA) [79].

6.2. Uzyskane materiały i ich rozkład masowy

W wyniku przeprowadzonego demontażu oraz badań strukturalnych określono udział poszczególnych grup materiałów wchodzących w skład generatora (Tabela 5).

Tabela 5. Udział poszczególnych grup materiałowych wchodzących w skład generatora
[opracowanie własne]

Lp.	Materiał	Masa [g]	Udział proc. [%]
1.	Stal – stojan, wał, elementy złączne, pokrywy	62310,0	89,08
2.	Aluminium – płaskowniki pozycjonujące magnesy trwałe, pierścienie aluminiowe	506,5	0,72
3.	Magnesy NdFeB	1984,0	2,84
4.	Tworzywo sztuczne – pokrywy, osłony	363,0	0,52
5.	Guma – uszczelnienia	38,0	0,05
6.	Miedź – uzwojenie generatora	4390,0	6,28
7.	Papier – izolator zwoju miedzianego w rowkach stojana, owinięty między uzwojeniem miedzianym	171,0	0,24
8.	Pozostałe materiały – kleje, żywice	5,0	0,01
9.	Mieszanina drobnych materiałów powstała w wyniku demontażu (cięcie uzwojenia miedzi, usunięcie tworzywa sztucznego z rowków stojana)	180,0	0,26
Suma		69947,5	100

Wynikiem demontażu generatora było wyselekcjonowanie materiałów. Generator ze względu na zróżnicowanie materiałowe, został podzielony na 10 następujących grup:

- elementy stalowe – do których wchodzi stojan, wał, elementy złączne, pokrywa łożyska (Rys.22),
- elementy aluminiowe – płaskowniki pozycjonujące magnesy trwałe, pierścienie aluminiowe (Rys.23),
- magnesy trwałe NdFeB (Rys.24),
- elementy z tworzywa sztucznego – pokrywy, osłony generatora (Rys.25), wypełnienie rowków stojana (Rys.26),
- elementy miedziane – uzwojenie generatora (Rys.27),
- elementy guma – uszczelnienia (Rys.28),
- elementy papier – izolator zwoju miedzianego w rowkach stojana, owinięty między uzwojeniem miedzianym (Rys.29),
- kleje i żywice – materiały do których wchodzi kleje oraz żywice (Rys.30),
- materiał powstały w wyniku demontażu - mieszanina drobnych materiałów (powstała w wyniku cięcia uzwojenia miedzi, usuwania laminatu) (Rys.31).



Rys.22. Elementy stalowe generatora
[opracowanie własne]



Rys.23. Elementy aluminiowe generatora
[opracowanie własne]



Rys.24. Magnesy trwałe NdFeB
[opracowanie własne]



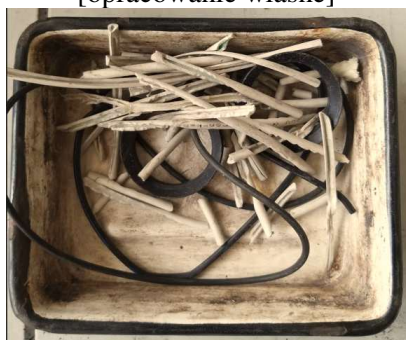
Rys.25. Pokrywy generatora z tworzywa sztucznego [opracowanie własne]



Rys.26. Wypełnienie rowków stojana
[opracowanie własne]



Rys.27. Uzwojenie miedziane stojana
[opracowanie własne]



Rys.28. Elementy gumowe generatora
[opracowanie własne]



Rys.29. Papier z rowków stojana
[opracowanie własne]



Rys.30. Pozostałe materiały – kleje, żywice
[opracowanie własne]



Rys.31. Mieszanina drobnych materiałów
powstała w wyniku demontażu
[opracowanie własne]

6.3. Surowce strategiczne w generatorze

Analizowany generator składa się z surowców krytycznych oraz z surowców strategicznym znaczeniu dla gospodarki. Generator jest narażony na ryzyko utraty dostaw surowców krytycznych m.in. ze względu na zastosowanie pierwiastków rzadkich ziemi, które są niezbędne do produkcji magnesów NdFeB. Same magnesy trwałe NdFeB składają się z następujących pierwiastków: żelazo, neodym, dysproz, prazeodym, bor, kobalt, gal, miedź, glin oraz tytan [44,45].

W związku z powyższym przeprowadzono szczegółową analizę zawartości pierwiastków zawartych w magnesach NdFeB (Tabela 6).

Przed przystąpieniem do oznaczenia zawartości pierwiastków, koniecznym było odpowiednie przygotowanie próbek do badań. Magnes pochodzący z demontażu generatora, został skruszony w kruszarce laboratoryjnej (Rys.32), a następnie zmielony w młynku laboratoryjnym (Rys.33). Z procesu mielenia uzyskano drobno zmielony materiał o uziarnieniu $<0,2$ mm, z którego wyselekcjonowano reprezentatywną pięciogramową próbkę.

Drobne uziarnienie materiału wynika z przyjętej metody oznaczania pierwiastków. Badanie wykonywane było metodą spektrometrii mas, z jonizacją w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-MS). Badanie zawartości pierwiastków w przekazanej próbce przebiegało w następujący sposób. Próbkę laboratoryjną badana była pod względem zawartości suchej masy, przeprowadzono także jej mineralizację. Próbkę następnie mineralizowano w układzie zamkniętym, na mokro, przy użyciu mineralizatora mikrofalowego. Jakość roztwarzania badanych próbek była poddana ocenie wizualnej, w celu uzyskania bezbarwnego i klarownego roztworu [80].



Rys.32. Kruszarka laboratoryjna Mawo-tech MKL1x1,5 [opracowanie własne]



Rys.33. Młynek laboratoryjny [opracowanie własne]

Wyniki zawartości wyznaczonych pierwiastków w magnesach NdFeB zaprezentowano w tabeli 6 oraz zilustrowano na rysunku 34.

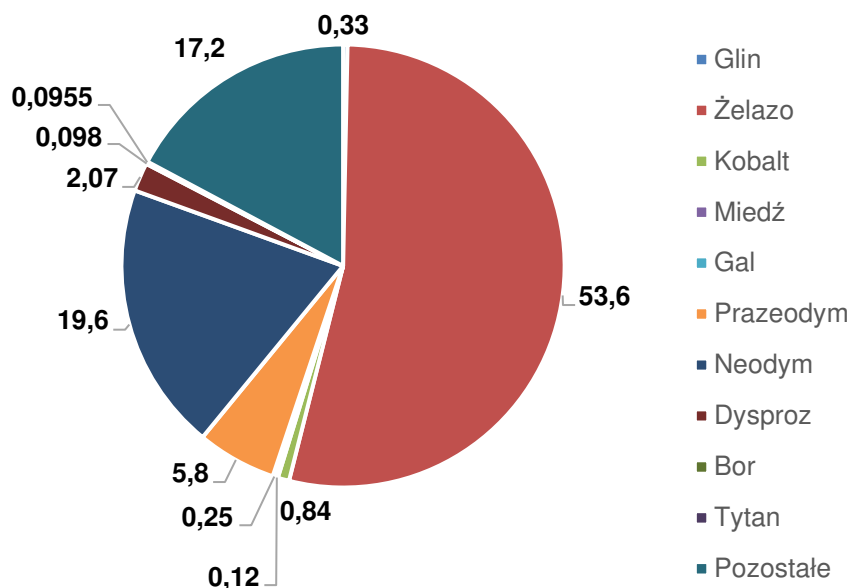
Tabela 6. Wyniki zawartości wyznaczonych pierwiastków w magnesach NdFeB [80]

Lp.	Materiał	Masa [g]	Udział proc. [%]
1.	Glin	6,55	0,33
2.	Żelazo	1063,42	53,6
3.	Kobalt *	16,66	0,84
4.	Miedź *	2,38	0,12
5.	Gal *	4,96	0,25
6.	Prazeodym *	115,07	5,80
7.	Neodym *	388,86	19,6
8.	Dysproz *	41,069	2,07
9.	Bor *	1,94	0,0980
10.	Tytan *	1,89	0,0955
11.	Pozostałe	341,24	17,2
Suma		1984,0	100

* pierwiastki o znaczeniu strategicznym

Na podstawie przeprowadzonego demontażu oraz analizy materiałowej generatora, wykazano że w samym tylko składzie magnesów NdFeB z urządzenia znajduje się 8 surowców krytycznych oraz strategicznych.

Łącznie w całym generatorze udział materiałów, w których są surowce krytyczne wynosi 9,84% (Magnesy NdFeB, elementy aluminiowe, miedziane uzwojenie stojana oraz miedziane przewody).



Rys.34. Rozkład wyznaczonych pierwiastków w magnesach NdFeB [opracowanie własne]

6.4. Ocena ryzyka utraty dostaw oraz stopień zastępowalności

Ocena ryzyka utraty surowców strategicznych i ich zastępowalność jest kluczowym elementem zarządzania łańcuchem dostaw. Pierwiastki wchodzące w skład magnesów NdFeB posiadają istotne znaczenie w perspektywie rozwoju gospodarczym. Ze względu na ich znaczenie, zostały ocenione pod kątem ryzyka utraty dostaw, wskaźnika recyklingu oraz stopnia zastępowalności (Tabela 7).

Ocena została przeprowadzona na podstawie badań prowadzonych przez Royal Society of Chemistry (RSC). Badania RSC z dziedziny chemii, dostarczają m.in. informacji na temat oceny pierwiastków [81].

Tabela 7. Ocena ryzyka utraty dostaw, wskaźnika recyklingu oraz stopienia zastępowalności magnesów NdFeB [81]

Lp.	Materiał	Udział proc. [%]	Ryzyko utraty dostaw	Wskaźnik recyklingu [%]	Stopień zastępowalności
1.	Glin	0,33	4,8	> 30	Średni
2.	Żelazo	53,6	5,2	> 30	Średni
3.	Kobalt	0,84	7,6	> 30	Średni
4.	Miedź	0,12	4,3	> 30	Niski
5.	Gal	0,25	7,6	< 10	Średni
6.	Prazeodym	5,80	9,5	< 10	Wysoki
7.	Neodym	19,6	9,5	< 10	Wysoki
8.	Dysproz	2,07	9,5	< 10	Wysoki
9.	Bor	0,0980	4,5	-	-
10.	Tytan	0,0955	4,8	> 30	Średni
	Suma	82,8	-	-	-

Magnesy neodymowe składają się z pierwiastków o różnych poziomach ryzyka utraty dostaw i zastępowalności. Wskaźnik ich recyklingu jest kluczowy dla ochrony zasobów naturalnych i zrównoważonej produkcji.

Ryzyko utraty dostaw oznacza się w skali od 1 (bardzo niskie ryzyko) do 10 (bardzo wysokie ryzyko). Określane jest poprzez zestawienie oceny zasobności w skorupie ziemskiej, oceny rozmieszczenia rezerw oraz oceny stabilności politycznej. Z przedstawionej analizy wynika, iż kobalt, gal, prazeodym, neodym oraz dysproz posiadają bardzo wysokie (wynoszące 9,5), ryzyko utraty dostaw. Najmniejsze ryzyka utraty dostaw, nie przekraczające wartości 5, występują w przypadku miedzi, boru, glinu i tytanu.

Wskaźnik recyklingu określa, jaki jest udział procentowy danego pierwiastka z odpadów poddawanych recyklingowi. W przypadku galu, prazeodymu, neodymu oraz dysprozu stopień recyklingu jest bardzo niski, wynosi poniżej 10%. Dla pozostałych analizowanych pierwiastków wartość wskaźnika przekracza 30%.

Stopień zastępowalności określa dostępność odpowiednich substytutów dla danych pierwiastków. Oznaczany jest w trzystopniowej skali: wysoki (zastąpienie substytutem nie jest możliwe lub bardzo trudne), średni (zastąpienie substytutem jest możliwe, ale może mieć znaczny wpływ na opłacalność lub wydajność rozwiązania), niski (zastąpienie jest możliwe z niewielkim wpływem na opłacalność bądź wydajność rozwiązania). W przypadku rozpatrywanych pierwiastków tylko dla miedzi stopień zastępowalności jest niski. Dla pozostałych pierwiastków stopień ten jest średni (glin, żelazo, kobalt, gal, tytan) lub wysoki (prazeodym, neodym, dysproz) [81].

Z przeprowadzonej analizy wynika, że analizowane pierwiastki mają duże znaczenie dla gospodarki, a ich brak lub niedostateczna dostępność może poważnie wpłynąć na funkcjonowanie różnych sektorów przemysłu.

7. Metodologia wyznaczania wartości śladu węglowego

Wyznaczenie wartości śladu węglowego LCA generatora jest oparte o protokół GHG i uwzględnia zastosowanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) w cyklu życia produktu. Zasady GOZ zakładają minimalizację zużycia surowców oraz powstawania odpadów, przy jednoczesnej redukcji emisji i wykorzystania energii w zamkniętej pętli procesowej [59,68].

Stosując modele GOZ zostanie określona wartość śladu węglowego LCA pozyskanego generatora turbiny wiatrowej. Wprowadzenie zasad GOZ zmniejszy wartość śladu węglowego rozpatrywanego okresu cyklu życia generatora.

Na podstawie m.in. wytycznych zawartych w protokole GHG przyjęto opracowanie metodologii wyznaczania wartości śladu węglowego dla poszczególnych elementów generatora. Określono prawdopodobne pochodzenie danego materiału, tj. skąd pochodzi dany surowiec, sposób w jaki był transportowany oraz procesy związane z produkcją dystrybucją i utylizacją.

Metodologię wyznaczania wartości śladu węglowego oparto na analizie i ocenie emisji gazów cieplarnianych (zwłaszcza CO₂), na podstawie następujących procesów [59,68]:

1. **Określenie zakresu:** zakres obejmujący pełny cykl życia produktu, począwszy od wydobycia surowców, etap produkcji, użytkowania aż do utylizacji. Zakres ten (Zakres 1,2,3) obejmuje emisję bezpośrednio związane z działalnością przedsiębiorstwa, pośrednie związane z wytworzeniem energii oraz spoza bezpośredniego zakresu przedsiębiorstwa, ale związane z jego działalnością.
2. **Identyfikacja źródeł emisji:** procesy związane z wydobyciem surowca, produkcją materiałów, transportem, energią zużywana podczas użytkowania, itp.,
3. **Zbieranie danych:** dane dotyczące ilości zużytych surowców, energii, emisji i innych istotnych parametrów dla każdego elementu w danym procesie,
4. **Obliczenia emisji:** na podstawie zebranych danych, obliczenie ilości emisji CO₂ i innych gazów cieplarnianych dla danego produktu (wykorzystanie specjalistycznego oprogramowania lub narzędzi do obliczeń śladu węglowego),
5. **Analiza wrażliwości:** wykonanie analizy zakładającej różne scenariusze procesów związanych m.in. z demontażem generatora i procesami recyklingu,
6. **Raportowanie:** przedstawienie wyników analizy w formie raportu,
7. **Redukcja emisji:** na podstawie uzyskanych wyników analizy, zmniejszenie emisje gazów cieplarnianych w zidentyfikowanych obszarach. Działania mających na celu poprawę efektywności energetycznej, zmianę technologii czy zmiany w procesach produkcyjnych – m.in. recykling generatora.

Warto zaznaczyć, że metodologia wyznaczania wartości śladu węglowego może się różnić w zależności od produktu, kraju, czy dostępności danych [68].

Dla rozpatrywanego zadania polegającego na określeniu wartości śladu węglowego pozyskanego generatora największe wyzwanie stanowią magnesy neodymowe.

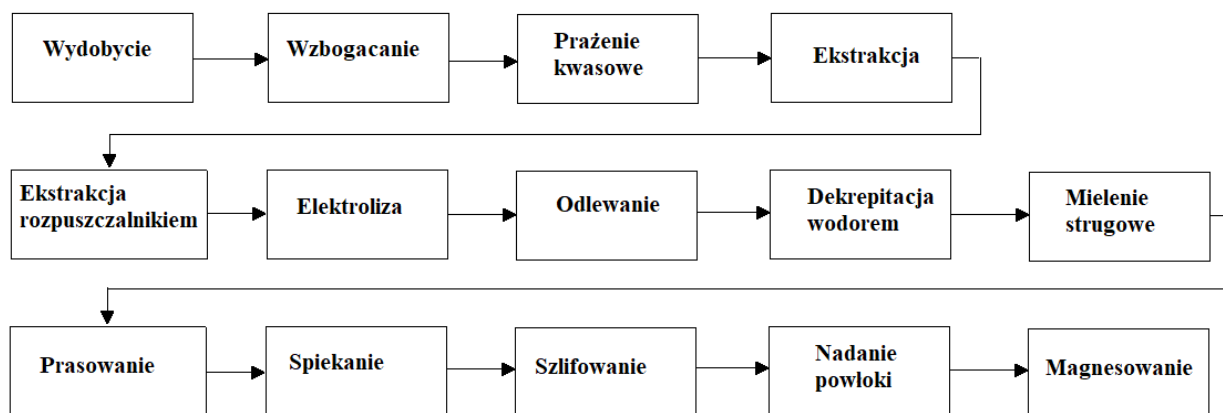
Proces produkcji magnezów neodymowych ze względu na złożoność procesów produkcyjnych i ich negatywny wpływ środowiskowy generuje znaczną wartość śladu węglowego (27,602 kg CO₂ eq). Wynika on z przeprowadzenia następujących procesów [44]:

- Wydobycie i rafinacja surowców - wydobycie surowców takich jak neodym, żelazo i bor. Surowce są następnie poddawane procesom rafinacji, aby uzyskać wysoką czystość chemiczną niezbędną do produkcji magnezów NdFeB.
- Granulacja - mieszanina surowców poddawana jest granulacji, w której proszek formowany jest w granulaty o określonym rozmiarze.
- Spiekanie - formy proszku są poddawane procesowi spiekania w kontrolowanych warunkach atmosferycznych i temperaturze.
- Magnetyzacja - magnesy NdFeB są następnie poddawane procesowi magnetyzacji, nadając im stałą magnetyzację oraz określony kierunek pola magnetycznego.
- Obróbka - w zależności od potrzeb, wyprodukowane magnesy neodymowe mogą być dalej przetwarzane i formowane w określone kształty i wielkości.
- Powlekanie: pokrycie powłoką ochronną.

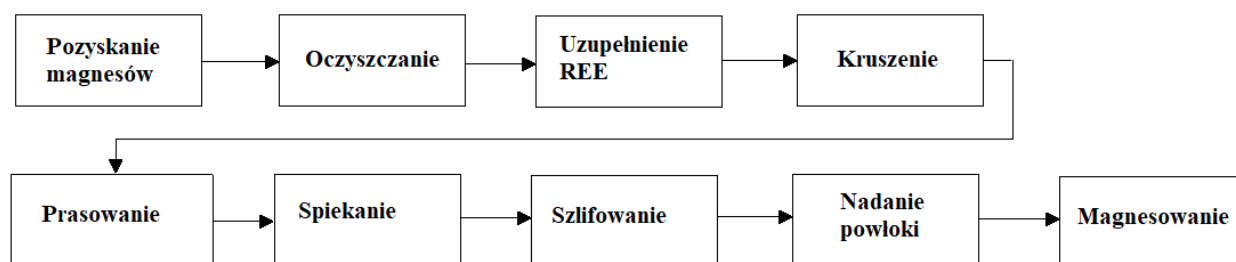
W związku z powyższym zrealizowano analizy, mające na celu zmniejszenie wartości śladu węglowego, rozpoczynając od magnezów neodymowych. W pracy założono zmniejszenie wartości śladu węglowego, poprzez recykling magnezów neodymowych, a tym samym eliminując konieczność między innymi wydobycia i rafinacji surowców krytycznych.

Na przykładzie magnezów neodymowych, na poniższych rysunkach zaprezentowano procesy produkcyjne, które są brane pod uwagę przy obliczaniu śladu węglowego. Na podstawie przeprowadzonych analiz, obliczona wartość śladu węglowego będzie uwzględniała następujące procesy, polegające na produkcji magnezów neodymowych z pierwotnych surowców – Rys.35.

Uzyskane wyniki, zostaną skonfrontowane z analizami opierającymi się na wartości śladu węglowego pochodzącego z produkcji magnezów neodymowych wyprodukowanych z materiałów odzyskanych z recyklingu – Rys.36.



Rys.35. Schemat produkcji magnezów neodymowych z pierwotnie wydobytych surowców
[opracowanie własne na podstawie 44]



Rys.36. Schemat produkcji magnesów neodymowych z recyklingu
[opracowanie własne na podstawie 44]

Powyższe analizy uwzględniają również transport materiału/produktu, pomiędzy poszczególnymi procesami. Dla powyższych wariantów zostaną również przeprowadzone analizy wrażliwości, obejmujące między innymi założenie różnych odległości. np. odległość między demontowanym generatorem a miejscem jego demontażu.

8. Obliczanie wartości śladu węglowego cyklu życia generatora

W niniejszym rozdziale opisano pochodzenie zebranych danych oraz zaprezentowano wyniki obliczeń śladu węglowego cyklu życia dla opisywanego generatora. Obliczenia uwzględniały różne scenariusze życia generatora, w tym:

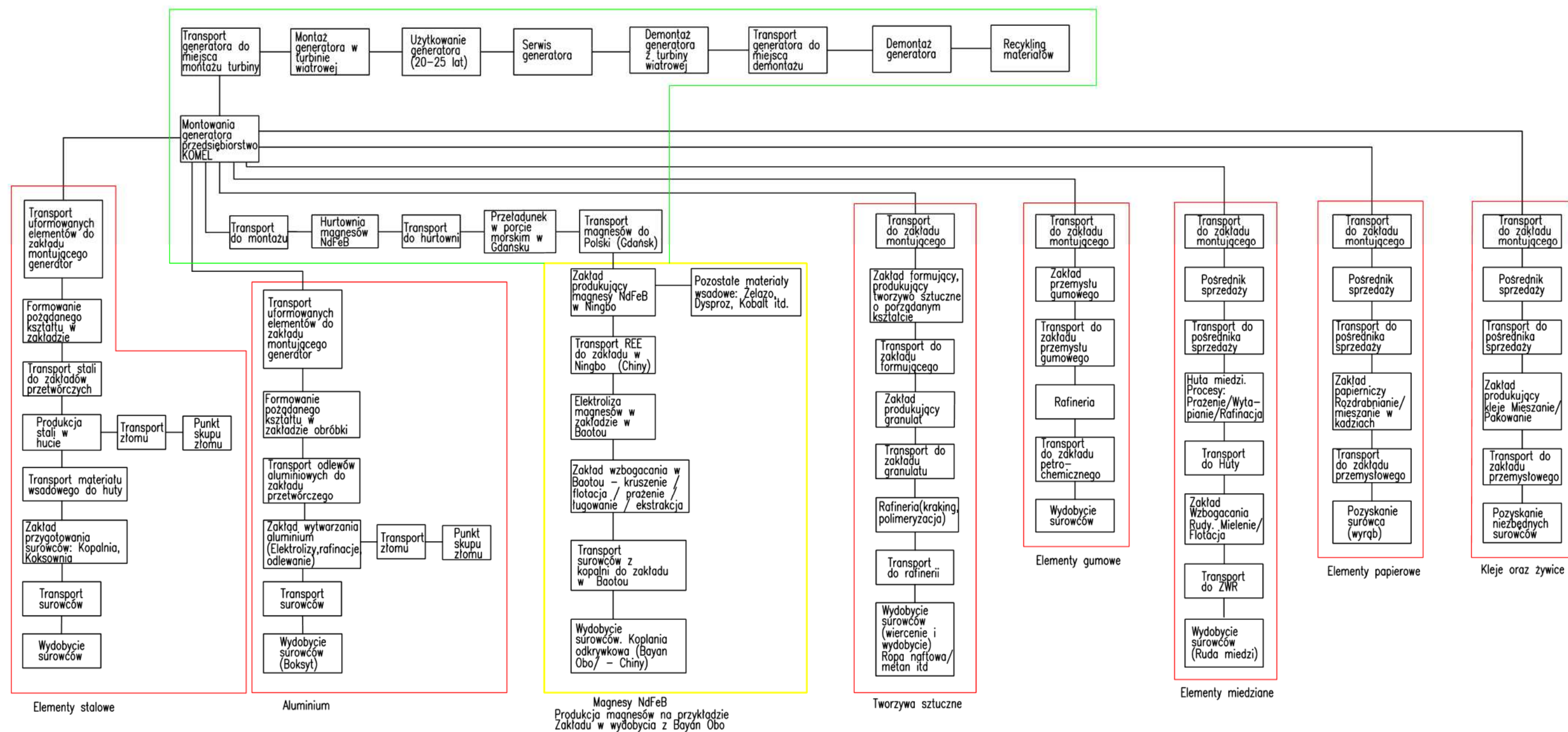
- wykorzystanie surowca pierwotnego do produkcji elementów generatora,
- zużycie mediów na poszczególnych etapach cyklu życia generatora,
- założenie różnych scenariuszy dotyczących wpływu zastosowanego rodzaju transportu oraz odległości między punktami odbioru wycofanego z eksploatacji generatora, a stacjami demontażu na wartość śladu węglowego,

8.1. Charakterystyka danych

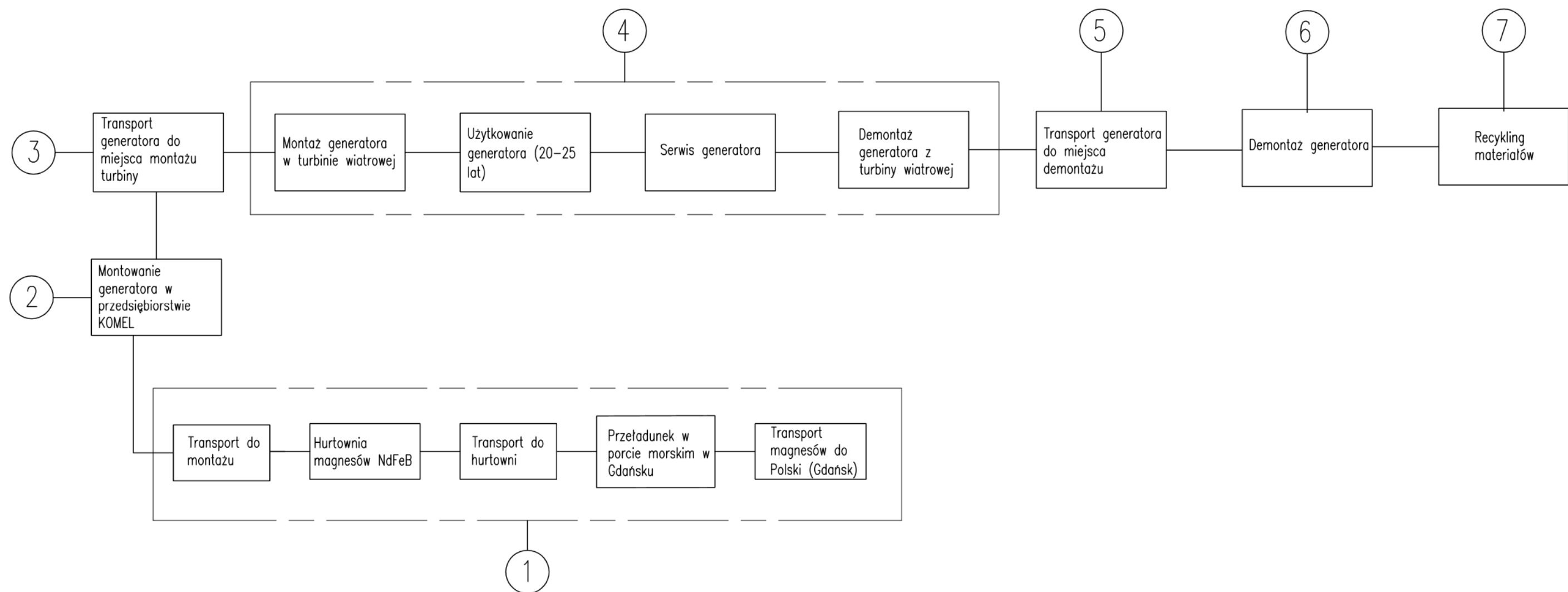
Na podstawie przyjętych założeń oraz danych opracowanych w ramach analizy LCA opracowano scenariusz cyklu życia generatora. Opracowany scenariusz posłuży zarówno do obliczenia wartości śladu węglowego poszczególnych składowych generatora, jak również jego wartości dla pełnego cyklu życia (Rys.37).

Pochodzenie konkretnych danych pozwalających na obliczenie wartości śladu węglowego zaznaczono odpowiednim kolorem obwódki i jest ono następujące:

- kolor czerwony – dane pochodzące z bazy Ecoinvent 3.3 oraz GaBi, które zostały przeliczone z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro [72–74].
- kolor żółty – dane bazujące na badaniach Schreiber A., Marx J., Zapp P. oraz Walachowicz F., określających wartość śladu węglowego. Scenariusz emisji uwzględnia transport materiałów, wydobywanie surowców w Bayan Obo (ChRL), przeprowadzenie wzbogacania materiału i elektrolizy w Baotou (ChRL) oraz ich produkcję w Ningbo [82].
- kolor zielony – dane które zostały opracowane na podstawie różnych źródeł literaturowych oraz informacji pozyskanych z przedsiębiorstwa KOMEL. W dalszej części podzielono i szczegółowo opisano poszczególne etapy tego cyklu życia produktu (Rys.38).



Rys.37. Schemat przedstawiający scenariusz cyklu życia generatora wraz z charakterystyką pochodzenia danych [opracowanie własne]



Rys.38. Wybrane etapy cyklu życia generatora z odnośnikami do opisów pochodzenia danych, które opisane są w podrozdziale 8.1 pracy [opracowanie własne]

Charakterystyka i pochodzenie danych dotyczących etapów cyklu życia generatora jest następująca:

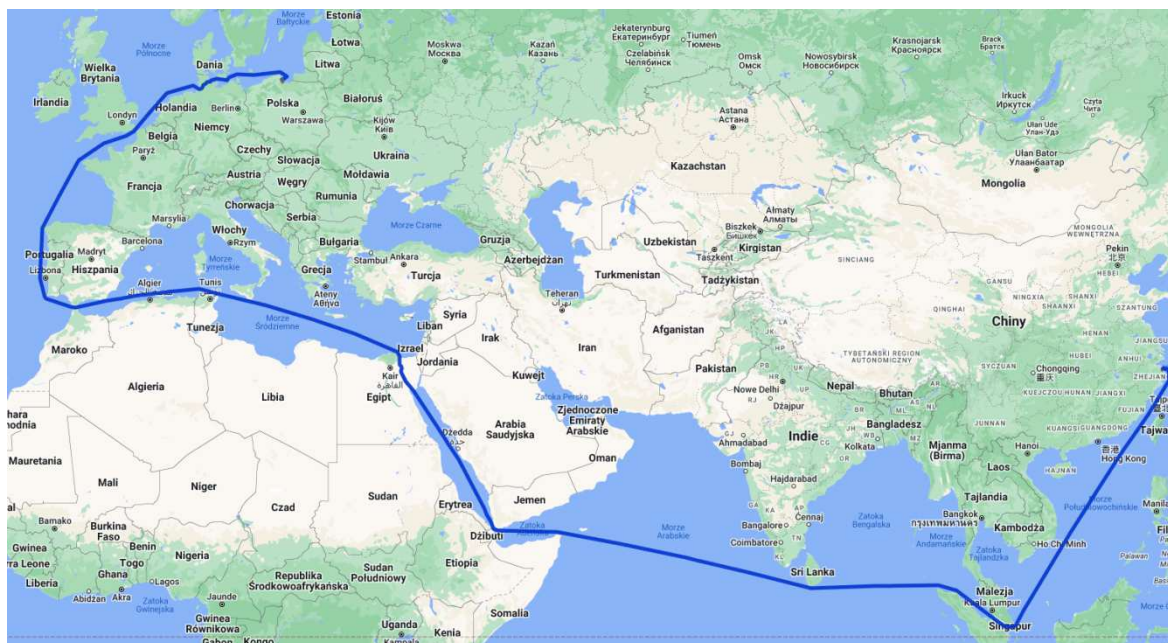
Etap obejmujący transport magnesów neodymowych z ChRL do przedsiębiorstwa KOMEL

Proces transportu tego typu materiałów składa się z następujących etapów:

- Pakowanie - Wyprodukowane magnesy neodymowe zostają pakowane, tak aby nie dopuścić do uszkodzenia materiału podczas transportu,
- Transport lokalny – Obejmuje transport z miejsca produkcji do portu morskiego, z wykorzystaniem samochodów ciężarowych lub wagonów kolejowych,
- Wysyłka drogą morską – magnesy ładowane są na kontenerowiec i następnie wysyłane drogą morską do portów w Polsce,
- Odprawa celna – magnesy poddane są odprawie celnej przez służby celne,
- Dystrybucja w Polsce – po odprawie celnej magnesy trafiają do pośrednika sprzedaży lub bezpośrednio do klientów hurtowych, czy detalicznych.

Na podstawie wiedzy literaturowej [82,83] oraz wiedzy przedsiębiorstwa KOMEL opracowano scenariusz dostawy magnesów oraz na tej podstawie obliczono wartość śladu węglowego.

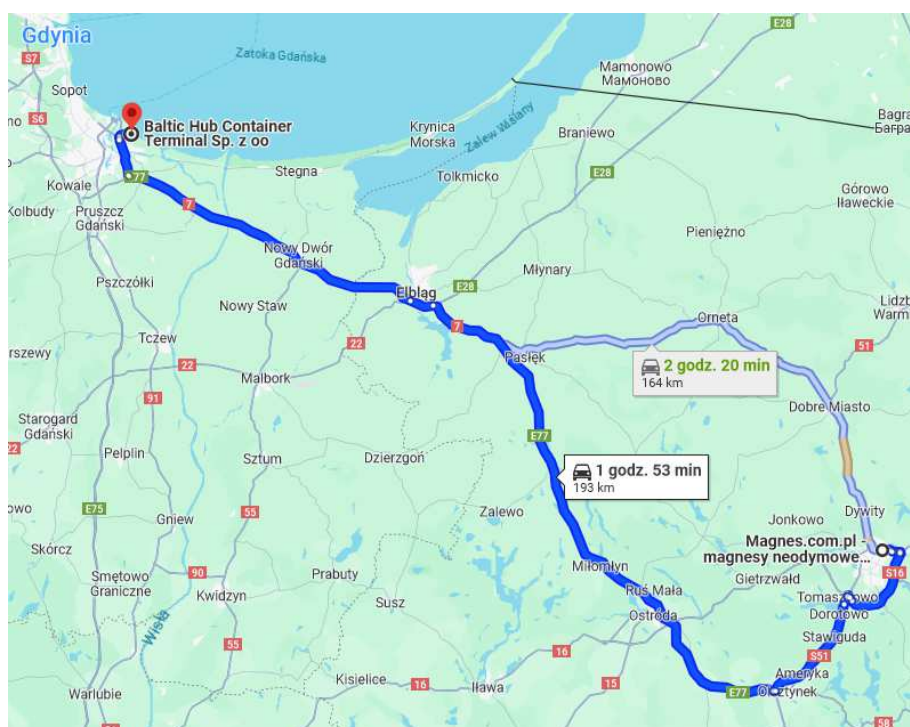
Magnesy produkowane są w miejscowości Ningbo (ChRL) przez przedsiębiorstwo Ningbo Konit & Nihon Magnetic Materials INC. Wyprodukowane magnesy są pakowane w zakładzie pracy, skąd następnie są transportowane samochodem ciężarowym do portu morskiego Ningbo Beilun International Container Terminals (24 km). Materiał załadowany do kontenerowca płynie do portu w Gdańsku - Baltic Hub Container Terminal Sp. z o.o. (20 500 km) (Rys.39) [83].



Rys.39. Transport magnesów neodymowych z portu w ChRL do portu w Polsce [83]

Transport magnesów na tym etapie został obliczony na podstawie kalkulatora EcoTransIT World, stanowiącego narzędzie do obliczeń wartości śladu węglowego w transporcie międzynarodowym. Obliczenia prowadzone są zgodnie z europejską normą EN 16258:2012. Scenariusz zakłada wykorzystanie samochodu ciężarowego spełniające normy spalania EURO 5 oraz kontenerowca o ładowności w przedziale 80 000 – 200 000 t [83,84].

Po odprawie celnej magnesy transportowane są samochodem dostawczym do pośrednika sprzedaży Mistral w Olsztynie (194 km) (Rys. 40). Ostatecznie magnesy transportowane są samochodem dostawczym do przedsiębiorstwa KOMEL w Sosnowcu (490 km) (Rys.41). Obliczenia wartości śladu węglowego tego etapu zostały przeprowadzone w kalkulatorze wykorzystującym bazę danych CaDI (The Carbon Database Initiative) [85]. Scenariusz zakłada wykorzystanie samochodu dostawczego spełniające normy spalania EURO 6.



Rys.40. Transport magnesów neodymowych z portu w Polsce do pośrednika sprzedaży w Olsztynie [opracowanie własne]



Rys.41. Transport magnesów neodymowych od pośrednika Mistral do firmy KOMEL [opracowanie własne]

W opracowaniu tego etapu uwzględniono wszystkie wartości śladu węglowego związane z transportem oraz operacjami związanymi z dostarczeniem magnesów neodymowych z Ningbo do Sosnowca (m.in. załadunki, przeładunki).

Etap obejmujący montaż wszystkich podzespołów generatora

Obliczenie śladu węglowego zostało wykonane dla przykładu montażu jednej sztuki generatora. Dane pozyskane zostały z przedsiębiorstwa KOMEL i dotyczą następujących parametrów [86]:

- emisje związane z dojazdem pracowników do miejsca pracy – emisje gazów cieplarnianych wynikające z dojazdu samochodami osobowymi,
- zużycie energii elektrycznej – zużycie energii elektrycznej związanej z oświetleniem, potrzebami socjalnymi pracowników oraz wykorzystywanej do procesów związanych z montażem generatora (wprasowanie elementów, łączenie podzespołów itd.),
- zużycie energii ciepłej – uśredniona wartość z całego roku, reprezentująca zużycie energii ciepłej wykorzystywanej do ogrzewania pomieszczeń oraz hali produkcyjnej.

Montaż jednego generatora zajmuję około jednego dnia pracy (około 8h), angażując do tego pięciu pracowników. Określono, że średnio każdy z pracowników ma do przebycia dystans związany z dostaniem się do oraz z powrotem z pracy na poziomie 20 km. Wykorzystywane do tego celu są samochody osobowe o średniej normie spalania EURO 6. Zużycie energii elektrycznej oraz energii ciepłej obliczono w przeliczeniu na kWh i wynosi ono 7 kWh dla energii elektrycznej oraz 42 kWh (0,151 GJ) dla energii ciepłej [86,87].

Obliczenia wartości śladu węglowego etapu, prowadzono z wykorzystaniem dostępnych kalkulatorów śladu węglowego związanych z transportem oraz zużyciem energii [83,87].

Etap obejmujący transport generatora do miejsca montażu

Etap obejmujący transport generatora do miejsca montażu w turbinie wiatrowej. Scenariusz zakłada zastosowanie analizy wrażliwości związanej z wpływem zróżnicowanej odległości pomiędzy miejscem produkcji a miejscem ostatecznego montażu generatora, na wartość śladu węglowego. Zaproponowane odległości wynoszą odpowiednio 50, 250 oraz 500 km.

Wykorzystywanym do tego celu środkiem transportu są samochody dostawcze, wyposażone w silniki spalinowe o normie spalania EURO 6.

Etap obejmujący eksploatację generatora w turbinie wiatrowej

W tym etapie uwzględniono wpływ związany z montażem generatora w turbinie wiatrowej, eksploatację, prace serwisowe oraz demontaż urządzenia po zakończeniu eksploatacji.

Montaż generatora polega na zainstalowaniu urządzenia wewnątrz przydomowej turbiny wiatrowej oraz połączenie z instalacją elektryczną gospodarstwa domowego. Do tego celu konieczne jest zastosowanie następujących narzędzi:

- wkrętarka i wiertarka – wiercenie otworów, wkręcanie śrub,
- klucze nasadowe, płaskie oraz dynamometryczny – dokręcanie śrub,

- poziomica i taśma miernicza – zachowanie wymiarów konstrukcyjnych oraz poziomu względem pozostałych elementów turbiny,
- drabina, młotek, piła – pozostałe narzędzia ułatwiające montaż urządzenia.

Wartości śladu węglowego związana jest przede wszystkim z wykorzystaniem energii elektrycznej zasilającej elektronarzędzia.

Użytkowanie generatora, w tym prace serwisowe, związane są z profilaktyką zapewniającą ciągłość pracy urządzenia, taką jak smarowanie łożysk oraz ogólne prace serwisowe, które umożliwiają przedwczesne wychwycenie nieprawidłowej pracy urządzenia.

Wytwarzany ślad węglowy związany jest przede wszystkim z wykorzystaniem energii elektrycznej zasilającej elektronarzędzia oraz z wykorzystaniem samochodów osobowych.

Operacje związane z demontażem generatora z wycofanej z eksploatacji turbiny wiatrowej są analogiczne (z odwróconą kolejnością działań) jak w przypadku montażu urządzenia.

Emisje gazów cieplarnianych generujące ślad węglowy związane są z przede wszystkim z wykorzystaniem energii elektrycznej zasilającej elektronarzędzia oraz z wykorzystaniem samochodów osobowych.

Etap obejmujący transport generatora do miejsca demontażu

Etap obejmujący transport generatora do miejsca demontażu zlokalizowanego w Gliwicach. Scenariusz zakłada zastosowanie analizy wrażliwości związanej z wpływem zróżnicowanej odległości pomiędzy miejscem demontażu turbiny wiatrowej, a stacją demontażu generatora.

Scenariusz zakłada zastosowanie analizy wrażliwości związanej z wpływem zróżnicowanej odległości pomiędzy miejscem demontażu generatora z turbiny wiatrowej a stacją demontażu generatora, na wartość śladu węglowego. Zaproponowane odległości wynoszą odpowiednio 50, 250 oraz 500 km.

Wykorzystywanym do tego celu środkiem transportu są samochody dostawcze, wyposażone w silniki spalinowe o normach spalania EURO 6.

Etap obejmujący demontaż generatora w stacji demontażu

Demontaż generatora jest zgodny z opracowaną metodologią demontażu, która została opisana w rozdziale 6.

W tym etapie do obliczenia wartości śladu węglowego, uwzględniono następujące parametry:

- emisję związane z dojazdem pracowników do stacji demontażu – emisja gazów wynikające z dojazdu pracowników samochodami osobowymi,
- zużycie energii elektrycznej – zużycie energii elektrycznej związane z oświetleniem, potrzebami socjalnymi pracowników oraz wykorzystywanej do procesów związanych z demontażem generatora (zastosowanie elektronarzędzi),

- zużycie energii ciepłej – uśredniona wartość z całego roku, reprezentująca zużycie energii ciepłej wykorzystywanej do ogrzewania pomieszczeń oraz hali produkcyjnej. Zużycie paliwa wynikające z zastosowania palnika gazowego do demagnetyzacji umożliwiającej odseparowanie magnesów od wału generatora.

Demontaż jednego generatora zajmuję około dwóch dni pracy (około 16h), angażując do tego dwóch pracowników. Określono, że średnio każdy z pracowników ma do przebycia dystans związany z dostaniem się oraz powrotem z pracy na poziomie 20 km. Wykorzystywane do tego celu są samochody osobowe o średniej normie spalania EURO 6. Założono że stacja demontażu generatora to hala o powierzchni do 50 m². Zużycie energii elektrycznej oraz energii ciepłej obliczono w przeliczeniu na kWh i wynosi 3 kWh dla energii elektrycznej oraz 38 kWh (0,137 GJ) dla energii ciepłej.

Etap obejmujący recykling materiałów wchodzących w skład generatora

Obliczenia wartości śladu węglowego dla zaproponowanych stopni oraz metod recyklingu generatora został opisany w rozdziale 9.

8.2. Wyniki obliczeń wartości śladu węglowego na poszczególnych etapach cyklu życia

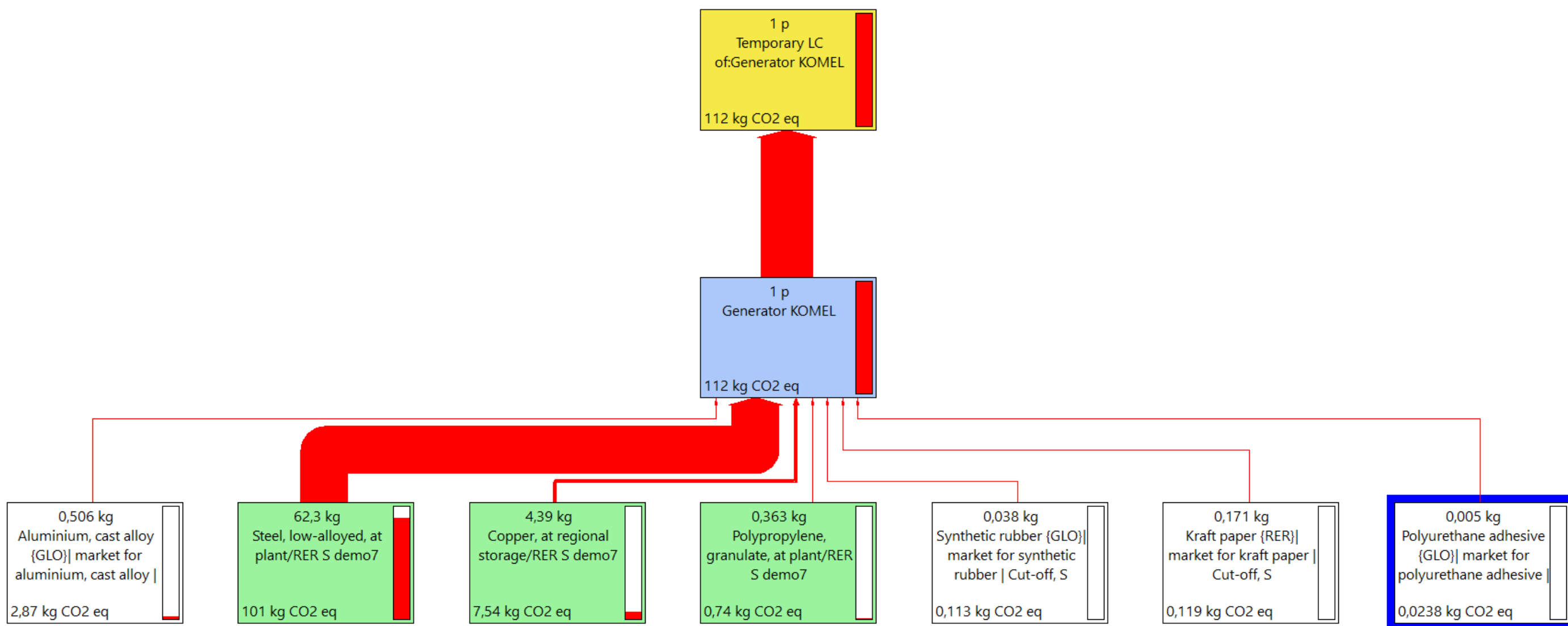
Wyniki obliczeń na podstawie danych z Ecoinvent, Gabi i oprogramowania SimaPro

Na podstawie opracowanego cyklu życia generatora wraz z charakterystyką pochodzenia danych, obliczono wartości śladu węglowego. Ślad węglowy został przeliczony na podstawie masy poszczególnych grup materiałowych.

W pierwszej kolejności obliczono wartości śladu węglowego, na podstawie obliczeń w programie SimaPro (Rys.42). Obliczenia dotyczyły następujących grup materiałowych [72–74]:

- Elementy aluminiowe (Aluminium , cast alloy)
- Elementy stalowe (Steel, low alloyed)
- Miedź (Copper, at regional storage)
- Tworzywa sztuczne (Polypropylene)
- Elementy gumowe (Synthetic rubber)
- Papier (Kraft paper)
- Kleje (Polyurethane adhesive)

Uzyskane wartości śladu węglowego uwzględniają wszystkie procesu produkcyjne począwszy od wydobycia surowców, do dostarczenia gotowych podzespołów do przedsiębiorstwa KOMEL.



Rys.42. Wartości śladu węglowego uzyskane z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro [opracowanie własne na podstawie 74]

Wyniki obliczeń na podstawie danych literaturowych związanych z magnesami NdFeB

Wyniki obliczeń związanych z wydobyciem i procesami związanymi z produkcją magnesów na terenie ChRL

Obliczenia wartości śladu węglowego magnesów neodymowych bazowały na wiedzy i doświadczeniach Schreiber A., Marx J., Zapp P. oraz Walachowicz F, zaprezentowanych w ramach artykułu „Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent Magnet Production from different Rare Earth Deposits” [82]. Opracowanie obejmuje ocenę LCA dla produkcji 1 kg magnesu NdFeB. Zakres pracy objął produkcję tlenków metali ziem rzadkich (REO) w Bayan Obo, procesy produkcyjne na terenie ChRL. W tabeli 8 zaprezentowano wyniki analizy LCA [82].

Tabela 8. Wyniki analizy LCA magnesów NdFeB [82].

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartość
1.	Kwaśnienie (punkt środkowy)	Mole of H ⁺ eq	0,618
2.	Zmiana klimatu, z wyłączeniem węgla biogenicznego	kg CO₂ eq	76,1
3.	Zmiana klimatu, włącznie z węglem biogenicznego	kg CO ₂ eq	74,6
4.	Ekotoksyczność wód	CTUe	538
5.	Eutrofizacja wód śródlądowych	kg P eq	0,0213
6.	Eutrofizacja wód morskich	kg N eq	0,089
7.	Eutrofizacja lądowa	Mole of N eq	1,08
8.	Toksyczność dla ludzi, efekty rakotwórcze	CTUh	3,9E-06
9.	Toksyczność dla ludzi, efekty nieonkogenne	CTUh	2,26E-05
10.	Promieniowanie jonizujące, zdrowie człowieka	kBq U235 eq	4,19
11.	Niszczenie ozonu	kg CFC-11 eq	5,7E-06
12.	Materia zawieszona/cząstki stałe nieorganiczne	kg PM2,5 eq	0,142
13.	Tworzenie ozonu fotochemicznego, zdrowie człowieka	kg NMVOC eq	0,252
14.	Wyczerpanie zasobów wodnych	m ³ eq	0,635
15.	Wyczerpanie zasobów, minerały, paliwa kopalne i odnawialne	kg Sb eq	0,445

Z powyższych danych wynika że produkcja 1 kg magnesów NdFeB generuje wartość śladu węglowego (z wyłączeniem węgla biogenicznego) na poziomie 76,1 kg CO₂ eq.

Demontaż generatora wykazał udział masowy magnesów neodymowych wynoszący 1984,0 g. Przeliczając proporcjonalnie dane literaturowe, wartość śladu węglowego magnesów NdFeB począwszy od wydobycia surowców oraz uzyskania gotowego produktu na terenie ChRL, wynosi 151,4 kg CO₂ eq.

Wyniki obliczeń związanych z transportem magnezów NdFeB do przedsiębiorstwa KOMEL

Pierwszym etapem transportu magnezów z ChRL jest transport lądowy z przedsiębiorstwa Ningbo Konit & Nihon Magnetic Materials INC do portu morskiego Ningbo Beilun International Container Terminals (24 km), a następnie drogą morską do portu w Gdańsku (Baltic Hub Container Terminal Sp. z o.o.) (20 500 km).

W celu obliczenia wartości śladu węglowego dla tego etapu wykorzystano EcoTransIT World, zgodny europejską normą EN 16258:2012 (Załącznik 1 – Rys.1) [84]. W obliczeniach uwzględniono:

- masę magnezów – 1,984 kg,
- emisyjność oraz ładowność samochodu ciężarowego dostarczającego magnesy do portu w ChRL – klasa ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 5,
- emisyjność oraz ładowność kontenerowca morskiego - BC Suez trade o ładowności w przedziale 80 000 – 200 000 t.

W obliczeniach założono pełny załadunek samochodu ciężarowego oraz kontenerowca, rozkładając tym samym ślad węglowy na pozostałe przewożone ładunki. Łącznym wartość śladu węglowego tego etapu wynosi według obliczeń 0,000294 t CO₂ eq (0,294 kg CO₂ eq).

Następnie obliczono wartość śladu węglowego transportu magnezów z portu morskiego w Gdańsku do przedsiębiorstwa KOMEL. Magnesy drogą samochodem dostawczym trafiają do pośrednika sprzedaży w Olsztynie, skąd następnie transportowane są do przedsiębiorstwa KOMEL. Dla obu tras transportowych założono wykorzystanie do tego celu najpopularniejszego w Polsce samochodu dostawczego Renault Trafic (stan na 2023r.) [88].

W celu obliczenia wartości śladu węglowego dla tego etapu wykorzystano kalkulator śladu węglowego, wykorzystującego bazę danych CaDI. W obliczeniach uwzględniono:

- wykorzystanie modelu Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km, emitujący dwutlenek węgla na poziomie 175,305 g/km [85],
- ładowność pojazdu – pełny załadunek samochodu (1017 kg) [89] rozkładający wartość śladu węglowego przejazdu. Udział masowy magnezów wynosi 1,984 kg,
- dystans pomiędzy poszczególnymi punktami: Gdańsk – Olszyn (194 km), Olsztyn – Sosnowiec (490 km).

W związku z powyższymi dla obu tras Gdańsk – Olsztyn (Załącznik 1 – Rys.2) i Olsztyn – Sosnowiec (Załącznik 1 – Rys.3) założono wykorzystanie tego samego modelu samochodu. Na tej podstawie obliczono wartość śladu węglowego przejazdu tych samochodu na powyższych trasach [85].

Wartość śladu węglowego powstały w wyniku przejazdu na trasie Gdańsk – Olsztyn dla wybranego modelu pojazdu wynosi 34,01 kg CO₂ eq. Zakładając pełne wykorzystanie pojazdu poprzez załadunek do pełna innymi towarami, wartość śladu węglowego dla transportu magnesów jest proporcjonalnie zredukowany. Udział masowy transportowanych magnesów wynosi 1,95% (1,984 kg magnesów przy ładnej masie transportowanych materiałów równej 1017 kg). Wartość śladu węglowego transportu magnesów na tej trasie wynosi 0,66 kg CO₂ eq.

W przypadku przejazdu na trasie Olsztyn – Sosnowiec dla wybranego modelu pojazdu wynosi 85,9 kg CO₂ eq. Proporcja udziału masowego jest identyczna jak w przypadku trasy z Gdańska do Olsztyna (1,95% magnesów). Wartość śladu węglowego transportu magnesów na tej trasie wynosi 1,67 kg CO₂ eq.

Łączna wartość śladu węglowego obejmującego wydobycie, procesy produkcyjne i transport do przedsiębiorstwa KOMEL wynosi 154,024 kg CO₂ eq.

Wyniki obliczeń na podstawie różnych źródeł literaturowych oraz informacji pozyskanych z przedsiębiorstwa KOMEL

Wyniki obliczeń śladu węglowego montażu generatora

Wartość śladu węglowego obliczono na przykładzie montażu generatora NdFeB w przedsiębiorstwie KOMEL. Opisywane parametry zostały przeliczone dla jedno dnia pracy w którym montuje się jeden generator. Uwzględniono i przeliczono następujące dane:

- zużycie energii elektrycznej wynikające z wykorzystania elektronarzędzi, maszyn przemysłowych, oświetlenia pomieszczeń – 7 kWh. Przeliczając średnią wartość śladu węglowego w Polsce (0,652 kg CO₂ eq na 1 kWh [90]), wartość śladu węglowego związana ze zużyciem energii elektrycznej wynosi 4,56 kg CO₂ eq.
- zużycie energii cieplej wynikające z ogrzewania pomieszczeń/ hali produkcyjnej zakładu – 42 kWh (przeliczono z wartości 0,151 GJ). W Polsce wartość śladu węglowego wynikająca z ogrzewania sieciowego wynosi 96,5 kg CO₂ eq/GJ [90]. W przypadku przedsiębiorstwa KOMEL, wartość śladu węglowego wynikająca z ogrzewania wynosi 14,57 kg CO₂ eq.
- zużycie paliwa wynikające z dojazdu i powrotu z pracy przez 5 pracowników – zakładając średni dystans do pokonania przez każdego z pracowników wynoszący 20 km (łącznie 100 km przez wszystkich z pracowników). Przy obliczeniach spalania bazowano na modelu Skoda Octavia 1.6 CR TDI 105 km norma spalin EURO 6 (wykorzystywany przez jednego z pracowników, jednocześnie o podobnej emisji spalin do samochodów pozostałych pracowników. Model tego pojazdu emituje dwutlenek węgla na poziomie 140,085 g/km [85]. Przy powyższych założeniach łączna emisja wyniesie 14,0085 kg CO₂ eq.

Łączna wartość śladu węglowego powstała w wyniku montażu generatora wynosi 33,14 kg CO₂ eq.

Wyniki obliczeń transport generatora do miejsca montażu w turbinie wiatrowej.

Transport generatora do miejsca montażu uwzględnia wpływ odległości na wartość śladu węglowego, przy założonych odległościach 50, 250 i 500 km.

Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem do tego celu Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km (tak jak w przypadku transportu magnesów do przedsiębiorstwa KOMEL). W obliczeniach śladu węglowego dla zaproponowanych tras założono, że samochód przewozi wyłącznie generator do miejsca montażu. Tym samym wartość śladu węglowego nie rozkłada się na przewóz ewentualnych dodatkowych materiałów. Transport uwzględnia zarówno dostarczenie generatora do miejsca montażu, oraz powrót samochodu do miejsca skąd wysyłany jest generator (podwajając tym samym każdy z zaproponowanych dystansów).

Dla zaproponowanych wariantów, wartość śladu węglowego wynosi odpowiednio:

- 50 km – 17,53 kg CO₂ eq. (Załącznik 1 – Rys.4) [85]
- 250 km – 87,65 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.5) [85]
- 500 km – 175,305 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.6) [85]

Zauważalny jest znaczący wzrost wartości śladu węglowego w przypadku wykorzystania pojazdu wyłącznie do transportu jednego produktu.

W rozdziale 8.4. przeprowadzono analizę wrażliwości zakładając różne scenariusze dystansu transportowanego ładunku, rodzaj zastosowanego środka transportu oraz stopień załadunku.

Wyniki obliczeń śladu węglowego montażu oraz serwisu generatora

W obliczeniach wartości śladu węglowego związanego z montażem uwzględniono wykorzystanie elektronarzędzi. Założono, że do montażu generatora w turbinie wiatrowej będzie konieczne wykorzystanie wiertarki akumulatorowej (36W) i wkrętarki udarowej (600W). Czas eksploatacji elektronarzędzi, potrzebny do montażu generatora wynosi jedną godzinę. W związku z założeniami zużycie energii elektrycznej wynosi 0,636 kWh $((600+36)/1000 * 1 = 0,636 \text{ kWh})$. Przeliczając średnią wartość śladu węglowego wynoszącą 0,652 kg CO₂ eq na 1 kWh [90], wartość śladu węglowego dla tego etapu wynosi 0,415 kg CO₂ eq.

Serwis generatora obejmując dojazd do generatora, smarowanie takich łożysk oraz ogólne prace serwisowe. Głównym źródłem śladu węglowego na tym etapie jest dojazd serwisanta. W obliczeniach uwzględniono dojazd serwisanta wyłącznie do rozpatrywanego generatora (serwisant nie realizuje innych prac w danym dniu). Generator może znajdować się w różnych regionach kraju, w związku z czym przeprowadzono analizę dostępności punktów serwisowych (Rys.43) [91]. Z przeprowadzonej analizy dostępności rynku serwisantów generatorów prądotwórczych wynika, że cały kraj posiada liczne punkty serwisowe. Tym samym założono że maksymalny dystans jaki serwisant musi pokonać wynosi 100 km. Założono, że serwisy prowadzone są co 5 lat (przy żywotności generatora wynoszącej 25 lat konieczne będą 4 wizyty serwisanta).



Rys.43. Sieć serwisantów generatorów prądoworczych na przestrzeni kraju [opracowanie własne]

Obliczenia wartości śladu węglowego prowadzono z wykorzystaniem do tego celu Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono, że na założonym dystansie samochód serwisanta jedzie wyłącznie do serwisowanego generatora. Założono najodleglejszy wariant w którym punkt serwisowy oddalony jest o 100 km od generatora. Łączna przebyta odległość uwzględniająca czterokrotną wizytę serwisową oraz powrót pracownika do firmy wynosi 800 km.

Na tej podstawie obliczono wartość śladu węglowego przejazdu samochodu dla powyższej trasy [85], która wynosi 140,244 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.7).

Łączna wartość śladu węglowego powstała w wyniku montażu generatora w turbinie wiatrowej oraz prac serwisowych (transport serwisanta) wynosi 140,659 kg CO₂ eq.

Wyniki obliczeń śladu węglowego transportu generatora do miejsca demontażu

Transport generatora do stacji demontażu zlokalizowanej w Gliwicach uwzględnia wpływ odległości na emisję śladu węglowego, przy założonych odległościach 50, 250 i 500 km. Obliczenia prowadzono ponownie z wykorzystaniem do tego celu Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km.

W obliczeniach wartości śladu węglowego dla zaproponowanych tras założono, że samochód przewozi wyłącznie generator do miejsca demontażu. Tym samym wartość śladu węglowego nie rozkłada się na przewóz ewentualnych dodatkowych materiałów. Transport uwzględnia zarówno dostarczenie generatora do miejsca demontażu, oraz powrót samochodu do miejsca skąd wysyłany jest generator (podwajając tym samym każdy z zaproponowanych dystansów).

Obliczenia wartości śladu węglowego dla zaproponowanych wariantów są identyczne jak w przypadku transportu generatora do miejsca montażu i wynoszą odpowiednio:

- 50 km – 17,53 kg (Załącznik 1 – Rys.4) [85]
- 250 km – 87,65 kg (Załącznik 1 – Rys.5) [85]
- 500 km – 175,30 kg (Załącznik 1 – Rys.6) [85]

Wyniki obliczeń śladu węglowego demontażu generatora

Założono, że stacja demontażu generatora to hala o powierzchni do 50 m². Opisywane parametry zostały przeliczone dla dwóch dni pracy w którym demontuje się jeden generator. Uwzględniono i przeliczono następujące dane:

- zużycie energii elektrycznej wynikające z wykorzystania elektronarzędzi, maszyn przemysłowych, oświetlenia pomieszczeń – 3 kWh. Przeliczając średnią wartość śladu węglowego w Polsce (0,652 kg CO₂ eq na 1 kWh [90]), wartość śladu węglowego związana ze zużyciem energii elektrycznej wynosi 1,956 kg CO₂ eq.
- zużycie energii cieplej wynikające z ogrzewania pomieszczeń/ hali produkcyjnej zakładu/ użycia palnika (demontaż magnesów neodymowych z wału) – 38 kWh (przeliczono z wartości 0,137 GJ). W Polsce wartość śladu węglowego wynikająca z ogrzewania sieciowego wynosi 96,5 kg CO₂ eq/GJ [90]. W przypadku stacji demontażu, wartość śladu węglowego wynikająca z ogrzewania wynosi 13,22 kg CO₂ eq.
- zużycie paliwa wynikające z dojazdu i powrotu z pracy przez 2 pracowników (dwa dni) – zakładając średni dystans do pokonania przez każdego z pracowników wynoszący 20 km (łącznie 40 km przez wszystkich z pracowników). Przy obliczeniach spalania bazowano na modelu Skoda Octavia 1.6 CR TDI 105 km norma spalin EURO 6 (wykorzystywany przez jednego z pracowników, jednocześnie o podobnej emisji spalin do samochodów pozostałych pracowników. Model tego pojazdu emituje dwutlenek węgla na poziomie 140,085 g/km [85]. Przy powyższych założeniach łączna emisja wyniesie 5,6034 kg CO₂ eq.

Łączna wartość śladu węglowego, powstała w wyniku montażu generatora wynosi 20,7884 kg CO₂ eq.

8.3. Wyniki obliczeń wartości śladu węglowego w całym cyklu życia generatora

Na podstawie przeprowadzonej analizy, obliczeń dla poszczególnych grup materiałowych oraz etapów cyklu życia generatora, uzyskano konkretne wartości śladu węglowego począwszy od wydobywania surowców do końca życia generatora. W dalszej części pracy (Rozdział 9), opracowano wielowariantowy scenariusz recyklingu generatora, który opisuje możliwe operacje pozwalające na zmianę wartości śladu węglowego dla opisywanego generatora.

Obliczenia uwzględniamy wszystkie emisje związane z procesami produkcyjnymi, eksploatacyjnymi i związane z wycofaniem z eksploatacji urządzenia. Pominięto wyłącznie marginalne wartości śladu węglowego wynikające z niewielkiego udziału procesów współtowarzyszących etapom cyklu życia generatora (np. zużycie energii elektrycznej w porcie kontenerowym w Gdańsku).

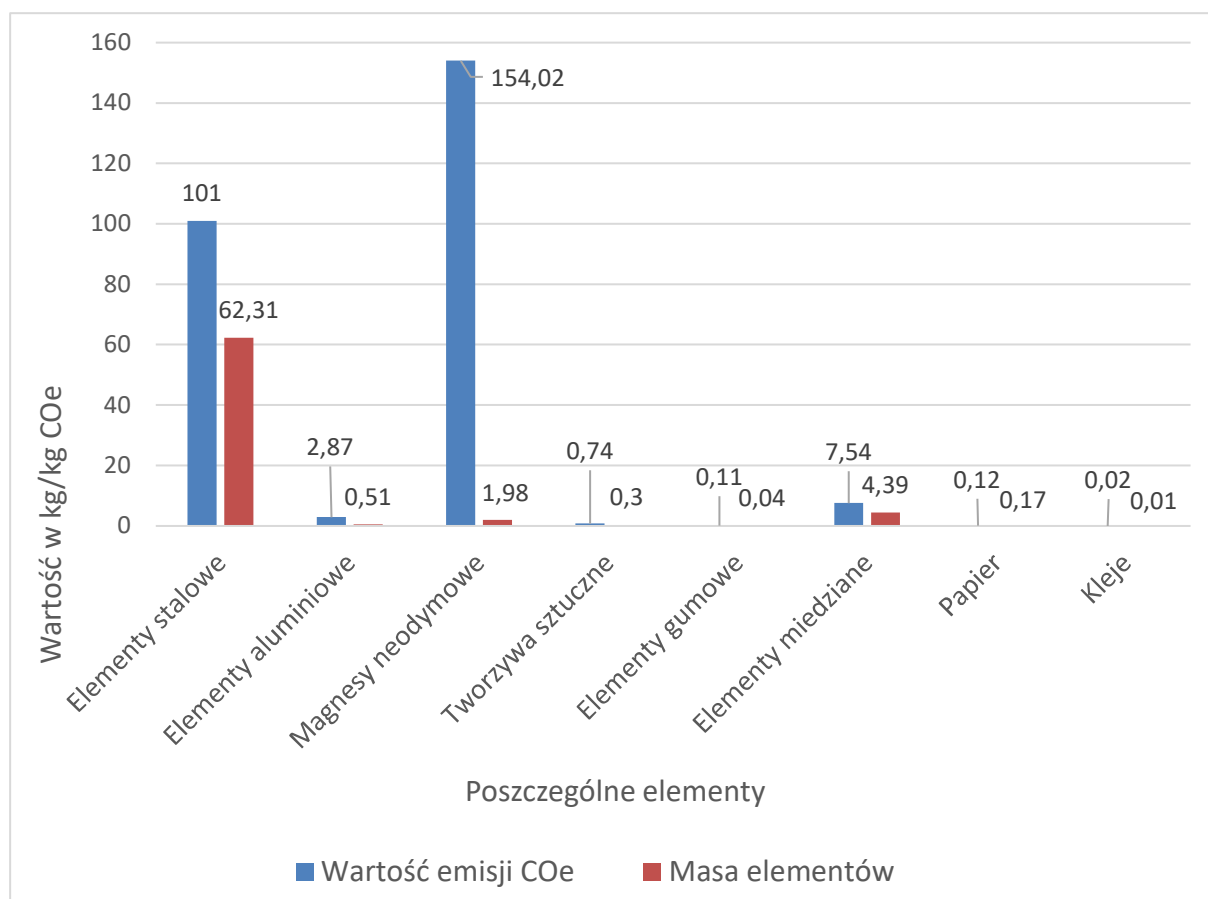
W poniższych tabelach zgrupowano wartości śladu węglowego obejmujące następujące zakresy:

- Tabela 9 – wyniki wartości śladu węglowego związane z produkcją oraz dostarczeniem gotowych komponentów do przedsiębiorstwa KOMEL
- Tabela 10 – wyniki wartości śladu węglowego obejmujące pozostałe etapy cyklu życia generatora

Tabela 9. Wyniki wartości śladu węglowego związane z produkcją oraz dostarczeniem gotowych komponentów do przedsiębiorstwa KOMEL [opracowanie własne]

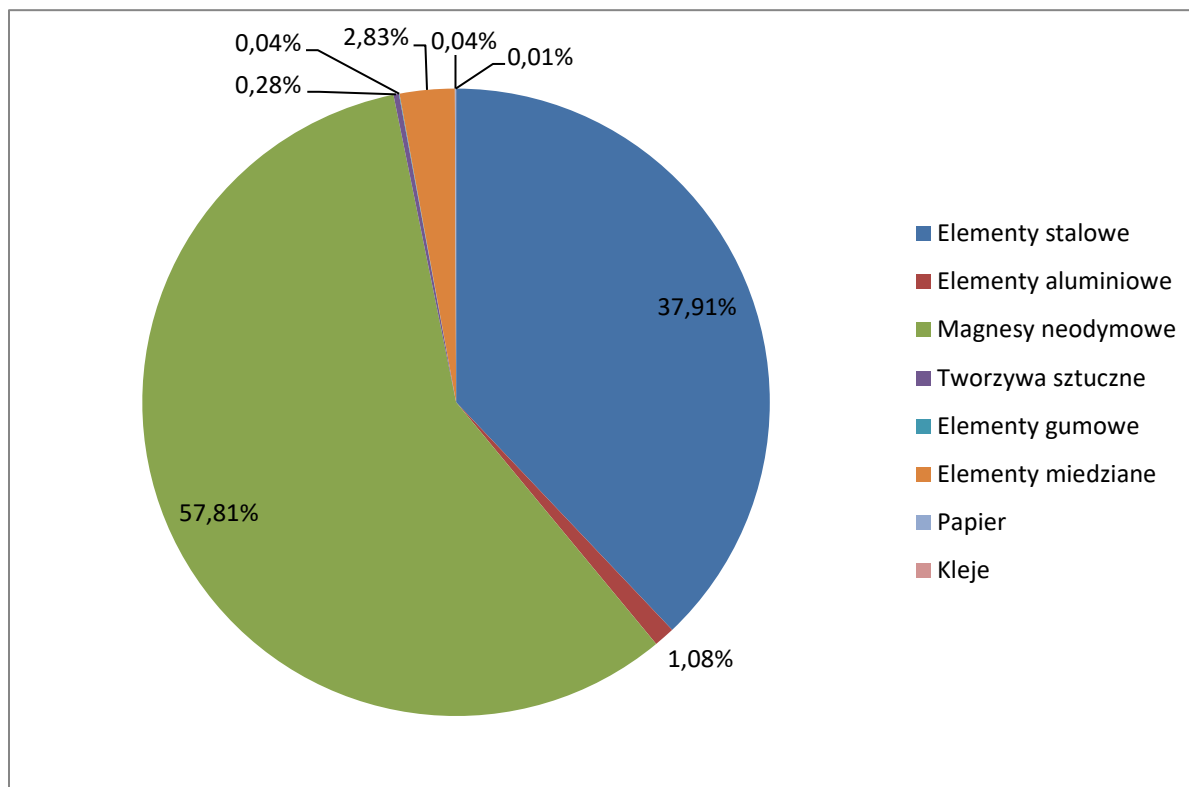
Lp.	Grupa materiałowa	Udział masowy [kg]	Wartość śladu węglowego [kg CO ₂ eq]
1.	Elementy stalowe	62,31	101,0
2.	Elementy aluminiowe	0,5065	2,87
3.	Magnesyt neodymowe	1,984	154,024
4.	Elementy z tworzywa sztucznego	0,363	0,74
5.	Elementy gumowe	0,038	0,113
6.	Elementy miedziane	4,39	7,54
7.	Elementy papierowe	0,171	0,119
8.	Kleje	0,005	0,024
Suma		69,76	266,43

Zauważalna jest znaczna dysproporcja pomiędzy masą danego elementu a jednostkową wartością jego śladu węglowego (Rys. 44). W przypadku magnesów neodymowych wartość śladu węglowego w porównaniu do ich masy (wartość w obu przypadkach wyrażona w kg) jest o 7663% wyższa.



Rys.44. Porównanie jednostkowej wartości śladu węglowego do masy poszczególnych elementów [opracowanie własne]

Rozpatrując udział procentowy wartości śladu węglowego dla poszczególnych elementów, zauważalna jest przeważająca wartość dla magnesów neodymowych (57,81%). Udział procentowy wartości śladu węglowego elementów stalowych stanowi niecałe 40% (37,91%) pomimo, 89,39% udziału masowego (Rys.45).



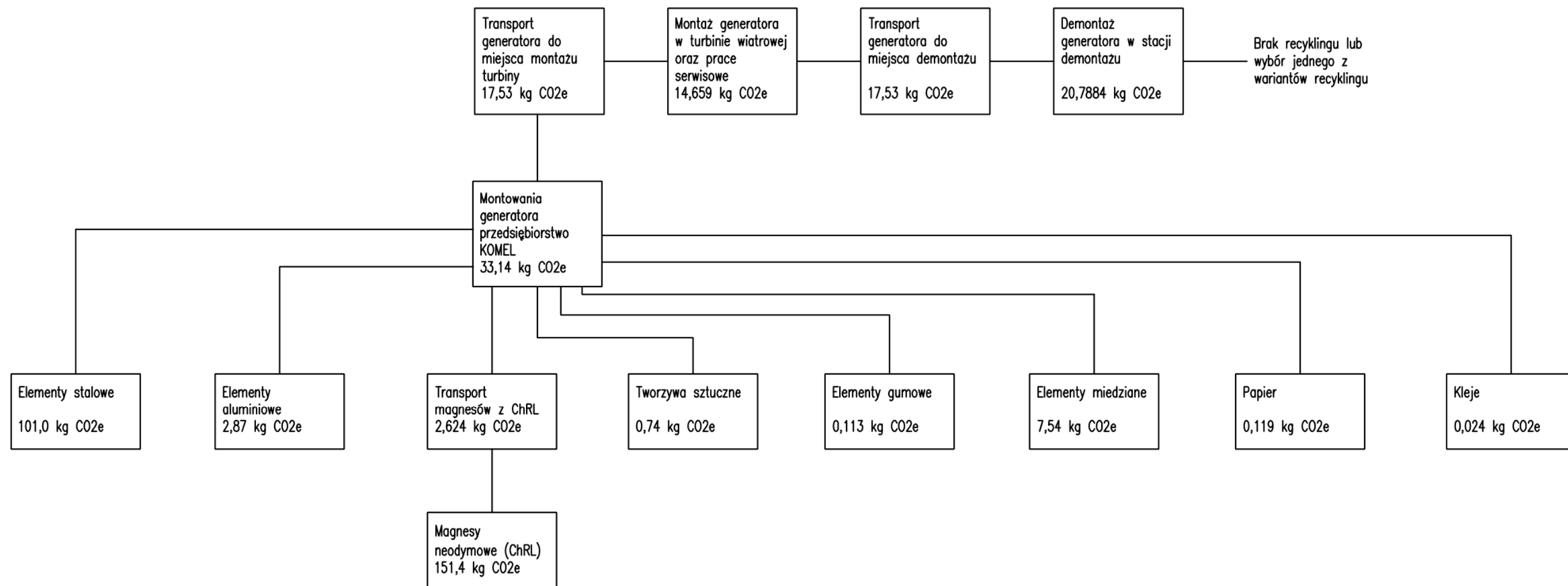
Rys.45. Udział procentowy wartości śladu węglowego dla poszczególnych elementów
[opracowanie własne]

Tabela 10. Wyniki wartości śladu węglowego obejmujące pozostałe etapy cyklu życia generatora
[opracowanie własne]

Lp.	Etap cyklu życia generatora	Wartość śladu węglowego [kg CO ₂ eq]
1.	Montaż generatora w przedsiębiorstwie KOMEL	33,14
2.	Transport generatora do miejsca montażu (wariant 50 km)	17,53
3.	Montaż generatora w turbinie wiatrowej oraz prace serwisowe	140,659
4.	Transport generatora do miejsca demontażu (wariant 50 km)	17,53
5.	Demontaż generatora w stacji demontażu	20,7884
Suma		229,65

Porównując sumaryczne wartości śladu węglowego dla procesów związanych z produkcją oraz dostarczeniem gotowych komponentów do przedsiębiorstwa KOMEL, a pozostałymi etapami cyklu życia generatora, otrzymujemy podobne wartości (266,43 i 229,65 kg CO₂ eq).

Łączna wartość śladu węglowego obejmująca procesy produkcyjne, użytkowanie oraz demontaż generatora (Rys.46) wynosi 496,08 kg CO₂ eq.



Rys.46. Schemat wartości śladu węglowego w LCA generatora obejmujący procesy produkcyjne, użytkowanie oraz demontaż [opracowanie własne]

8.4. Analiza wrażliwości

W ramach analizy wrażliwości przeanalizowano wpływ zmiany scenariusza cyklu życia generatora na zmianę wartości śladu węglowego. Jest to pierwsza wariacja (poprzedzająca zaproponowane warianty recyklingu) umożliwiającą redukcję wartości śladu węglowego generatora.

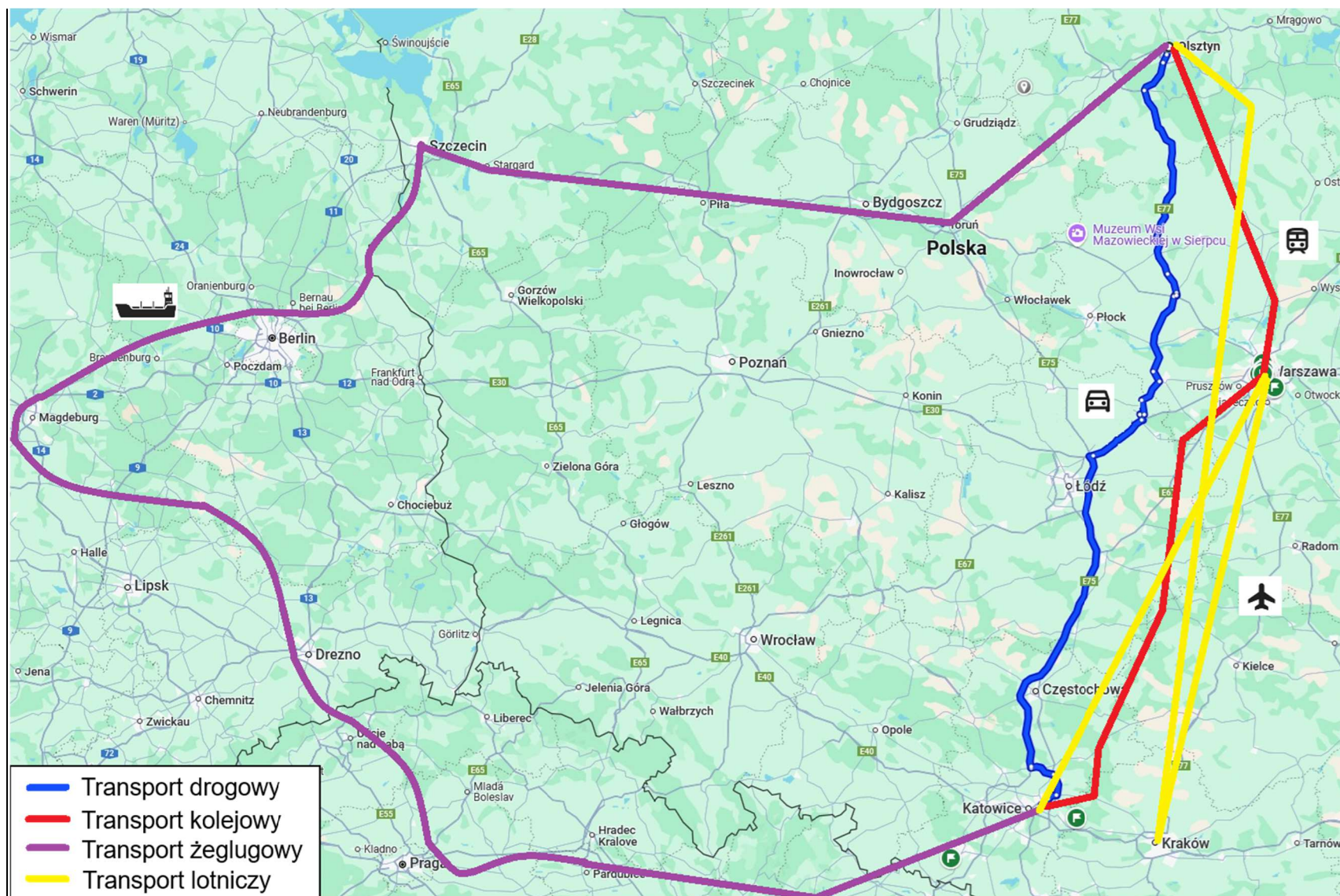
Z przeprowadzonych obliczeń transportu generatora zauważalna jest duża dysproporcja w wartości śladu węglowego wraz ze zmianą założonego dystansu do przebycia. Istotny wpływ posiada również stopień załadunku środka transportu, pozwalając na rozkład wartości śladu węglowego na poszczególne transportowane materiały (np. niewielka wartość śladu węglowego transportu z ChRL do Polski magnesów neodymowych z wykorzystaniem w pełni załadowanego kontenerowca).

W związku z powyższym w przeprowadzonej analizie wrażliwości, skupiono się na zmiennych związanych z typem transportu dla zaproponowanego dystansu koniecznego do przebycia. Przedmiotem analizy wrażliwości jest jeden z etapów cyklu życia generatora, obejmujący transport magnesów neodymowych z Olsztyna do Sosnowca. Dystans ten został wybrany ze względu na wysoką wartość śladu węglowego związaną z transportem magnesów (szczególnie w przypadku transportu wyłącznie magnesów do jednego generatora) oraz dostępną zróżnicowaną infrastrukturę transportową pomiędzy tymi miastami. Infrastruktura obejmująca sieci drogowe, kolejowe, żeglugi śródlądowej oraz porty lotnicze pozwoli na wytypowanie najmniej emisyjnego środka transportu.

W ramach analizy porównano wartość śladu węglowego związanego z transportem magnesów, w której zakłada się transport magnesów z pełną dostępną ładowności (poza pierwszym wariantem) następującymi środkami transportu (Rys. 47):

- transport drogowy z wykorzystaniem samochodu dostawczego (transport wyłącznie magnesów, bez innego ładunku w transporcie),
- transport drogowy z wykorzystaniem samochodu dostawczego,
- transport drogowy z wykorzystaniem samochodu ciężarowego,
- transport kolejowy z wykorzystaniem pociągu towarowego,
- żegluga śródlądowa z wykorzystaniem barki,
- transport drogą powietrzną z wykorzystaniem samolotu.

Tak jak w poprzednich rozdziałach do obliczania wartości śladu węglowego wykorzystano kalkulator EcoTransIT World [83] oraz kalkulator z bazą danych CaDI [85]. Punktem początkowym obliczeń jest przedsiębiorstwo Mistral w Olsztynie, natomiast miejscem docelowym jest przedsiębiorstwo KOMEL w Sosnowcu.



Rys.47. Wyznaczone trasy dla wytypowanych środków transportu w analizie wrażliwości [opracowanie własne]

Transport drogowy samochodem dostawczym (transport wyłącznie magnesów do generatora)

Transport drogowy obejmuje wykorzystanie dostępnej sieć dróg publicznych, wynosząca na tym dystansie Olsztyn-Sosnowiec 490 km. Pierwszy z wariantów zakłada przewóz magnesów neodymowych, które są jedynym ładunkiem transportowanym przez samochód dostawczy. Obliczenia prowadzono ponownie z wykorzystaniem do tego celu Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. Dla zaproponowanego wariantu, wartość śladu węglowego wyniesie 85,9 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.8) [85].

Transport drogowy samochodem dostawczym (transport magnesów do generatora z wykorzystaniem dostępnej ładowności pojazdu)

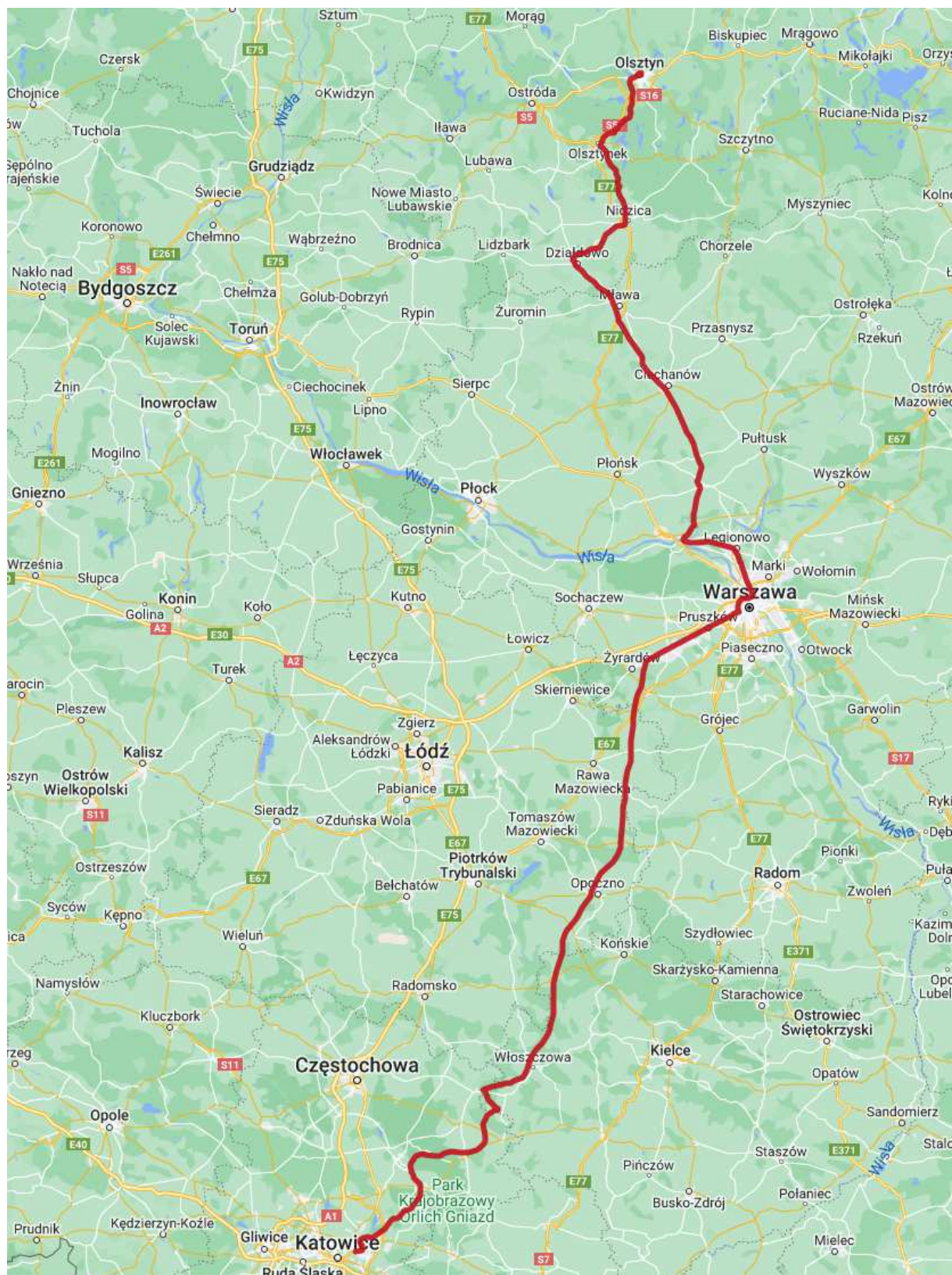
Zaproponowany wariant pokrywa się z cyklem życia generatora i został obliczony w rozdziale 8.2. Przejazd na trasie Olsztyn – Sosnowiec dla wybranego modelu pojazdu wynosi 85,9 kg CO₂ eq. W pełni wykorzystując dostępną ładowność pojazdu innymi towarami (lub innymi magnesami) ślad węglowy dla transportu magnesów jest proporcjonalnie zredukowany. Wartość śladu węglowego transportu magnesów na tej trasie zostanie zredukowana do poziomu 1,67 kg CO₂ eq [85].

Transport drogowy samochodem ciężarowym

Wariant zakłada wykorzystanie w pełni załadowanego pojazdu ciężarowego w klasie ładowności 26-40 t, spełniającego normy spalin na poziomie EURO 6. Dla zaproponowanego wariantu, wartość ślad węglowy wyniesie 0.072 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.9) [83].

Transport kolejowy pociągiem towarowym

Transport kolejowy obejmuje wykorzystanie dostępnej sieć trakcyjnej, wynoszącej na tym dystansie 528 km (Rys.48). Transport realizowany jest prawie wyłącznie z wykorzystaniem pociągu elektrycznego. Dystans pomiędzy dworcem kolejowym w Olsztynie a przedsiębiorstwem Mistral oraz pomiędzy dworcem kolejowym w Sosnowcu przedsiębiorstwem KOMEL wynosi ok. 1,5 km. Transport drogowy (dostarczenie i odbiór z dworca) realizowany jest samochodem dostawczym (Renault Trafic), natomiast transport kolejowy pociągiem elektrycznym o ładowności 1000 t. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdów. Dla zaproponowanego wariantu, wartość śladu węglowego wyniesie 0,034 kg CO₂ eq (transport kolejowy – 0,032 kg CO₂ eq, transport drogowy 0,002 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.10) [83].

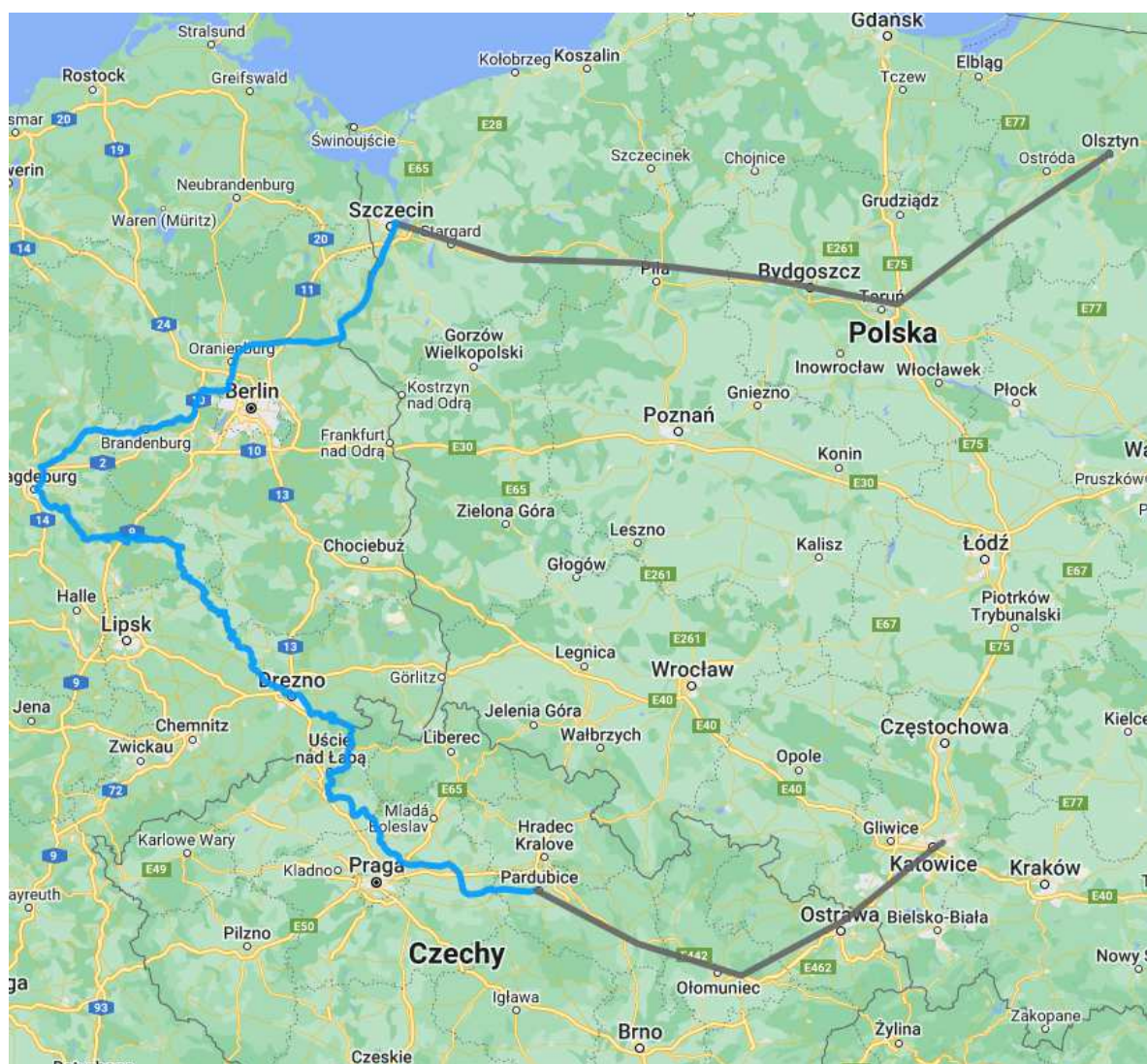


Rys.48. Trasa konieczna do pokonania przez magnesy neodymowe z wykorzystaniem transportu kolejowego [83]

Transport żegluga śródlądową z wykorzystaniem barki

Transport żegluga śródlądową dla zaproponowanego dystansu obejmują wykorzystanie dostępnej sieć rzecznej przez terytorium Polski, Niemiec oraz Czech. Ze względu na ograniczony dostęp do sieci żeglugi śródlądowej (kolor niebieski), część trasy realizowana jest z wykorzystaniem transportu drogowego (kolor szary) (Rys.49). Transport drogowy realizowany jest na łącznym dystansie 806,5 km (terytorium Polski i Czech) pojazdem ciężarowym w klasie ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 6. Żegluga realizowana jest na dystansie 835,8 km (terytorium Niemiec i Czech) z wykorzystaniem barki Euro I-IV o ładowności w przedziale 0-1500 t. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności środków transportu [83].

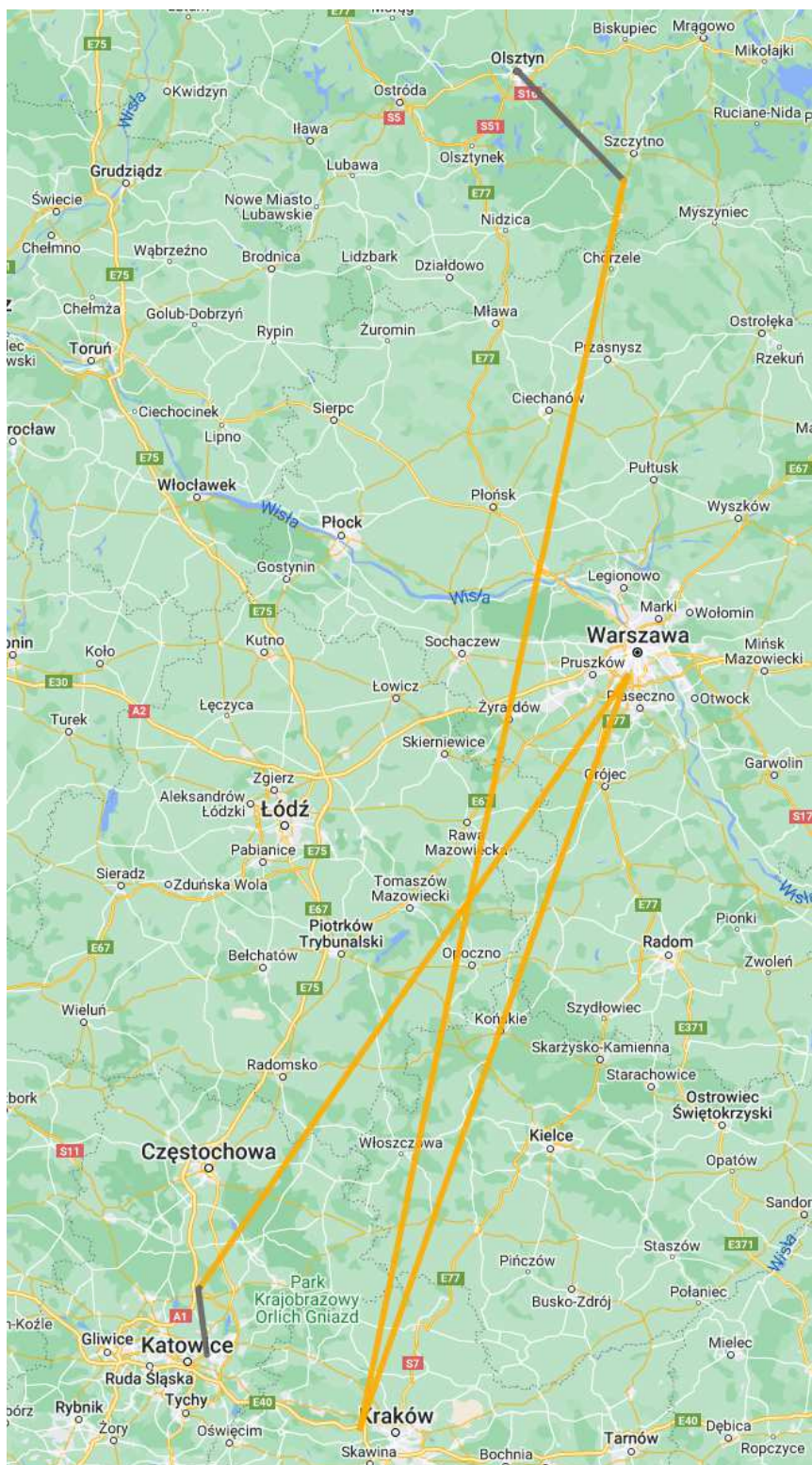
Wartość śladu węglowego związana z transportem drogowym wyniesie 0,132 kg CO₂ eq, natomiast wartość związana z żegluga barką wyniesie 0,047 kg CO₂e. Łączna wartość śladu węglowego dla tego rodzaju transportu wyniesie 0,178 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.11) [83].



Rys.49. Trasa konieczna do pokonania przez magnesy neodymowe z wykorzystaniem żeglugi śródlądowej [83]

Transport drogą powietrzną z wykorzystaniem samolotu

Transport drogą powietrzną związany jest wykorzystaniem samolotu krótkiego zasięgu oraz samochodu ciężarowego dostarczającego oraz odbierającego towar na i z lotniska. Ze względu na aktualną obowiązującą siatkę połączeń lotniczych oraz infrastrukturę lotniczą w Polsce, przelot pomiędzy lotniskami „Port lotniczy Olsztyn-Mazury” a lotniskiem „Katowice Airport” odbywa się z międzylądowaniami w Krakowie (Port Lotniczy im. Jana Pawła II Kraków-Balice) oraz Warszawie (Lotnisko Chopina Warszawa). Przeloty (kolor pomarańczowy) realizowane są z wykorzystaniem samolotu krótkiego o łącznym dystansie 1148,6 km. Transport drogowy (kolor szary) realizowany jest na łącznym dystansie 86,2 km pojazdem ciężarowym w klasie ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 6 (Rys.50). W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności środków transportu [83].



Rys.50. Trasa konieczna do pokonania przez magnesy neodymowe z wykorzystaniem samolotu krótkiego zasięgu [83]

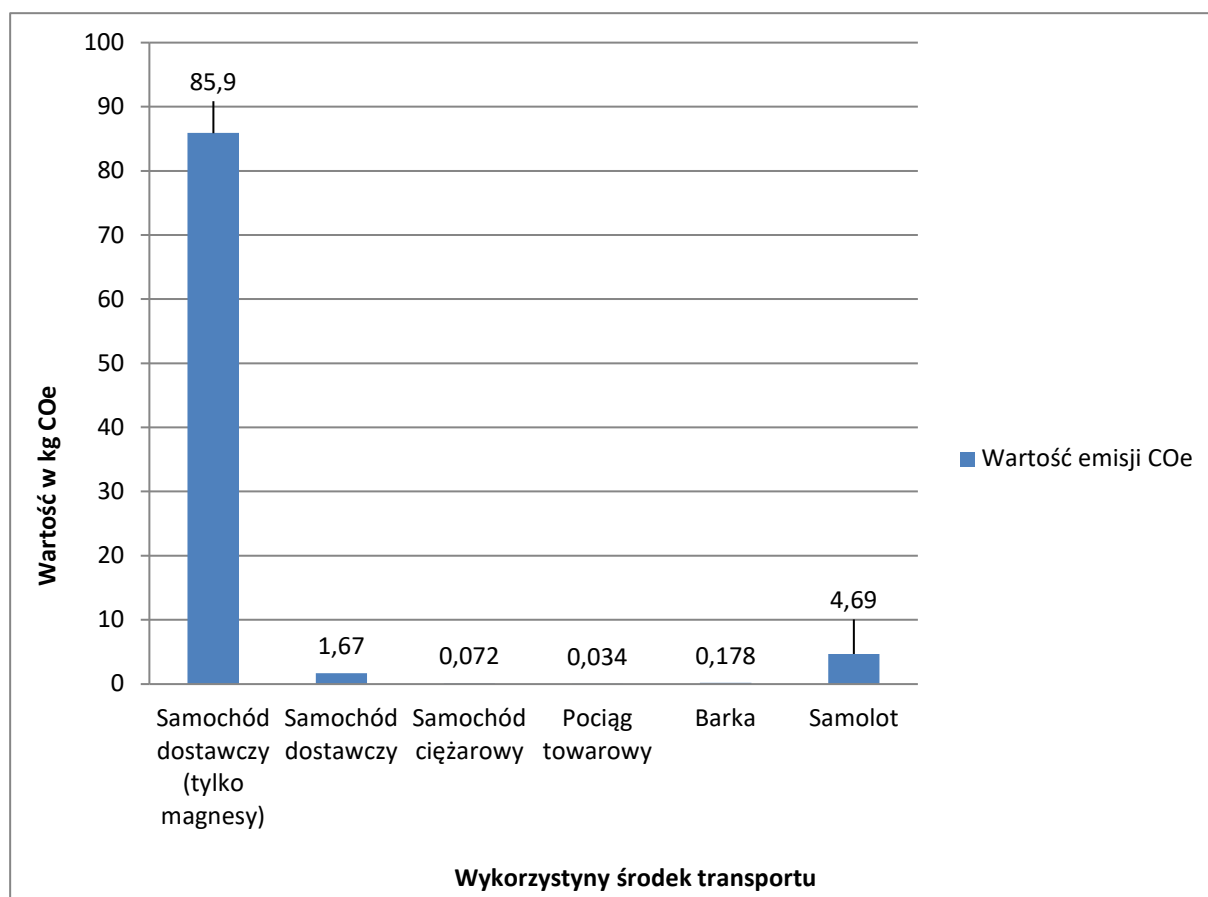
Wartość śladu węglowego związana z transportem drogowym wyniesie 0,015 kg CO₂ eq, natomiast wartość związana z transportem drogą powietrzną wyniesie 4,675 kg CO₂ eq. Łączna wartość śladu węglowego dla tego rodzaju transportu wyniesie 4,69 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.12) [83].

Podsumowanie analizy wrażliwości związanej z różnymi scenariuszami transportu magnezów neodymowych

Analiza wrażliwości dotycząca wpływu scenariuszy transportu na wartość śladu węglowego generatora wykazała, że typ transportu i stopień załadunku mają istotny wpływ na emisję CO₂. Analiza transportu magnezów neodymowych z Olsztyna do Sosnowca, z wykorzystaniem różnych środków transportu (samochód dostawczy, samochód ciężarowy, pociąg towarowy, barkę i samolot) wykazała zróżnicowaną wartość śladu węglowego (Tabela 11) (Rys.51).

Tabela 11. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych scenariuszy transportu w analizie wrażliwości [opracowanie własne]

Lp.	Scenariusz transportu	Wartość śladu węglowego [kg CO ₂ eq]
1.	Transport drogowy z wykorzystaniem samochodu dostawczego (wyłącznie magnesy bez materiałów współtransportowanych)	85,9
2.	Transport drogowy z wykorzystaniem samochodu dostawczego (w pełni wykorzystana dostępna ładowność)	1,67
3.	Transport drogowy z wykorzystaniem samochodu ciężarowego	0,072
4.	Transport drogowy z wykorzystaniem pociągu towarowego	0,034
5.	Transport drogowy z wykorzystaniem barki	0,178
6.	Transport drogowy z wykorzystaniem samolotu	4,69

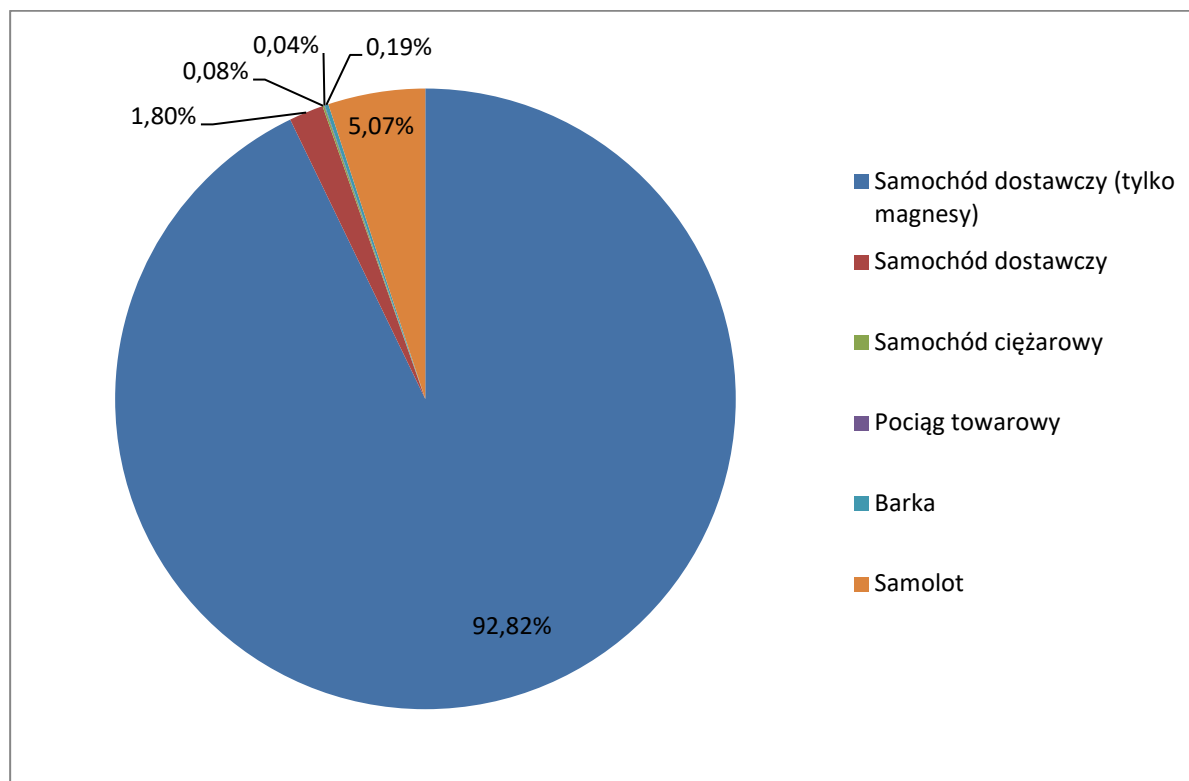


Rys.51. Wartość śladu węglowego dla poszczególnych scenariuszy wykorzystania różnych środków transportu [opracowanie własne]

Z przeprowadzonej analizy wynika, że najniższą wartość śladu węglowego uzyskano w przypadku wykorzystania transportu zbiorowego. Najniższy poziom uzyskano dla wariantu wykorzystującego pociąg towarowy (0,034 kg CO₂ eq), nieco wyższy dla samochodu ciężarowego (0,072 kg CO₂ eq) oraz barki (0,178 kg CO₂ eq). Ze względu na ograniczony dostęp cieków wodnych dla zaproponowanej trasy, dostępność żeglugi śródlądowej jest mocno ograniczona. Konieczne jest wykorzystanie na znaczącym dystansie (806,5 km) transportu drogowego, pozwalającego na wykorzystanie żeglugi śródlądowej. Powodują to wydłużenie czasu transportu towarów. Wyższą wartość śladu węglowego uzyskano dla samochodu dostawczego, który pomimo wykorzystania pełnej dostępnej ładowności pozostawia ślad węglowy na poziomie 1,67 kg CO₂ eq.

Najwyższa wartość śladu węglowego przypada na wykorzystanie samolotu (4,69 kg CO₂ eq) oraz samochodu dostawczego, który transportuje wyłącznie magnesy do generatora (85,9 kg CO₂ eq). Wykorzystanie samolotu krótkiego zasięgu dla zaproponowanej trasy związane jest z licznymi międzylądowaniami, które wielokrotnie zwiększają dystans pomiędzy założonym punktem startowym i docelowym. W przypadku samochodu dostawczego, wynika to z braku rozkładu wartości śladu węglowego na towary współtransportowane. Ostatnie dwa opisywane rozwiązania są zdecydowanie najmniej przyjazne środowiskowo.

Podsumowując, na przykładzie magnesów neodymowych wykazano zróżnicowane scenariusze rozpatrywanego etapu cyklu życia, wpływające na wartość śladu węglowego (Rys.52). Jest to jeden z czynników (zaraz po recyklingu), który w znaczący sposób ogranicza wartość śladu węglowego danego produktu.



Rys.52. Rozkład wartości śladu węglowego dla poszczególnych scenariuszy wykorzystania różnych środków transportu [opracowanie własne]

9. Recykling generatora

Chcąc realizować prace zgodnie z zasadami gospodarki obiegu zamkniętego, konieczne jest przeprowadzenie recyklingu poszczególnych grup materiałowych wchodzących w skład generatora. Recykling, odzysk oraz ponowne użycie, są procesami pozwalającymi na redukcję wartości śladu węglowego danego produktu. W tym rozdziale opisano przyjęte warianty procesów związanych z nadaniem ponownej przydatności rozpatrywanym grupom materiałowych. Analizowane procesy obejmują następujące scenariusze końca życia generatora (po przeprowadzeniu demontażu na stacji demontażu):

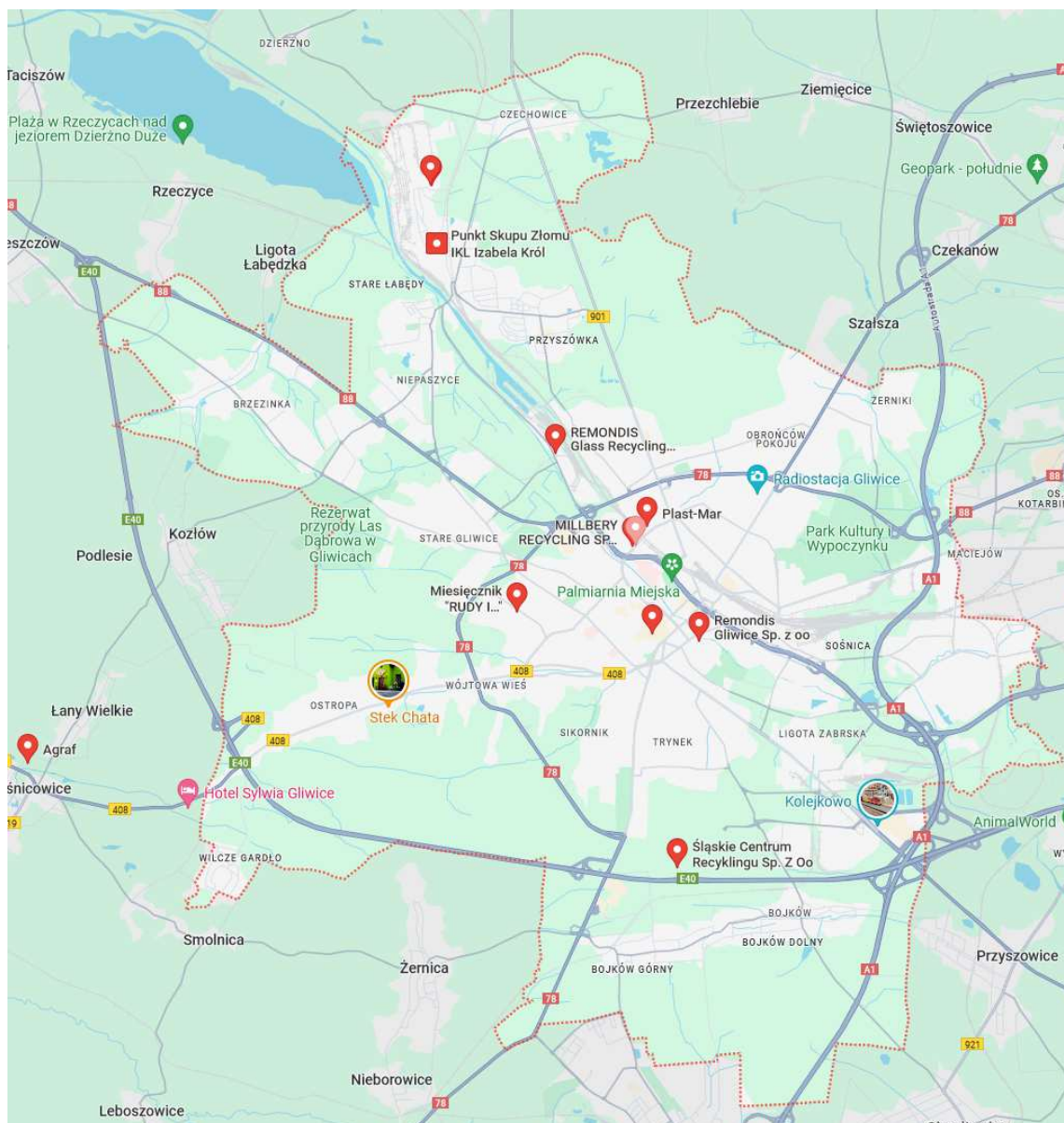
- unieszkodliwianie wszystkich elementów poprzez składowanie na składowisku odpadów,
- przeprowadzenie częściowego recyklingu materiałów (grupy materiałowe dla których w Polsce prowadzone są procesy związane z recyklingiem),
- ponowne użycie zdemontowanych magnesów neodymowych,
- recykling magnesów neodymowych,
- kompleksowy recykling wszystkich podzespołów generatora.

Dla każdego z powyższych scenariuszy procesu recyklingu oraz ponownego użycia, przeprowadzono analizę określającą wartość śladu węglowego oraz ewentualną redukcję wartości śladu związaną z ograniczeniem produkcji pierwotnej danego surowca. Punktem odniesienia względem którego będzie porównywany efekt redukcji wartości śladu węglowego dla poszczególnego scenariusza recyklingu, jest wartość śladu węglowego cyklu życia generatora (do etapu związanego z demontażem elementów) równa 496,08 kg CO₂ eq.

9.1. Unieszkodliwianie wszystkich elementów na składowisku odpadów

Pierwszy wariant jest najmniej korzystny ze względu na ochronę środowiska, ponieważ nie pozwala na odzysk żadnych materiałów. Metoda ta prowadzi do długoterminowego zajmowania przestrzeni składowania, co wiąże się z koniecznością rozbudowy istniejących obiektów lub tworzenia nowych. Ponadto, składowanie odpadów prowadzi do zanieczyszczenia środowiska, marnotrawstwa surowców oraz generuje dodatkową wartość śladu węglowego. Wartość ta wynika przede wszystkim z konieczności transportu urządzenia wycofanego z eksploatacji na odpowiednie składowisko.

Scenariusz zakłada przetransportowanie wszystkich grup materiałowych generatora do Punktu Selektywnej Zbiórki Odpadów Komunalnych (PSZOK) stanowiącego ich składowisko. Cykl życia generatora zakłada lokalizację stacji demontażu na terenie miasta Gliwice. W obrębie miasta znajduje się wiele punktów prowadzących działalność związaną z gospodarką odpadami (Rys.53).



Rys.53. Lokalizacja potencjalnych składowisk wyeksploatowanych elementów generatora
[opracowanie własne]

Punkty składowania elementów generatora również znajdują się w Gliwicach, a dystans pomiędzy nimi określono maksymalnie na 10 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związaną z transportem generatora. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu, które pozwoli na transport 14 generatorów (masa jednego generatora wynosi 69,95 kg, przy dostępny załadunku 1017,0 kg). Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na jeden generator (obejmujący transport generatorów do składowiska oraz powrót do stacji demontażu) wynosi 0,25 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.13) [85].

Podsumowanie wartości śladu węglowego wynikającego z braku recyklingu materiałów

Wartość śladu węglowego wynikająca z przyjętego procesu gospodarki odpadami:

0,25 kg CO₂ eq

Uzyskana redukcja wartości śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

Brak (wzrost bilansu o 0,25 kg CO₂ eq)

9.2. Częściowy recykling materiałów wchodzących w skład generatora

Kolejny z wariantów polega na analizie wpływu recyklingu części materiałów wchodzących w skład generatora. Rozpatrywane są grupy materiałowe co do których w Polsce, prowadzony jest rozpowszechniony na szeroką skalę recykling [92,93].

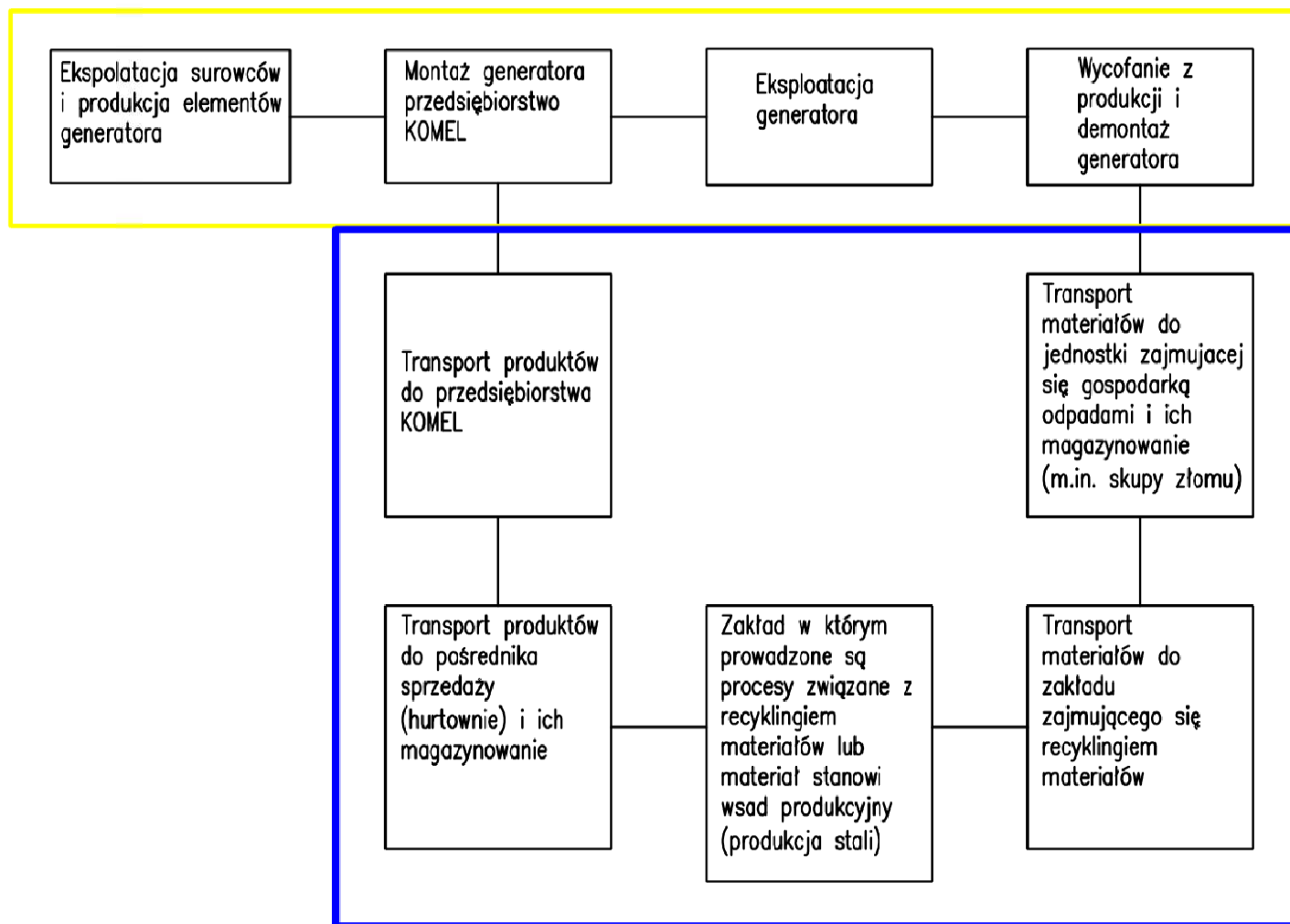
W przypadku generatora analiza prowadzona będzie dla następujących grup materiałowych:

- elementy stalowe,
- elementy aluminiowe,
- tworzywa sztuczne,
- elementy miedziane,
- elementy papierowe.

Dla każdej z grup materiałowych przeprowadzono analizę wartości śladu węglowego polegającą na opracowaniu scenariuszu zakładającego transport materiału ze stacji demontażu do poszczególnych jednostek zajmujących się recyklingiem i procesami tam realizowanymi. Celem wszystkich procesów jest uzyskanie gotowego produktu z recyklingu (o tych samych parametrach jak bazowy) oraz obliczenie jak zastosowanie produktu z recyklingu (kolor niebieski) (w stosunku do elementu wyprodukowanego z surowców pierwotnych (kolor żółty)) jest w stanie obniżyć wartość śladu węglowego dla cyklu życia generatora (Rys.54).

W przeprowadzonej analizie wzięto pod uwagę wartość śladu węglowego wynikającego z:

- transportu materiałów pomiędzy stacją demontażu a kolejnym etapem związanym z recyklingiem danego materiału (obliczenia własne),
- procesami przemysłowymi związanymi z nadaniem ponownej przydatności wycofanym z eksploatacji materiałom (dane literaturowe).



Rys.54. Schemat LCA dla wybranych recyklingowanych elementów generatora [opracowanie własne]

9.2.1. Recykling elementów stalowych

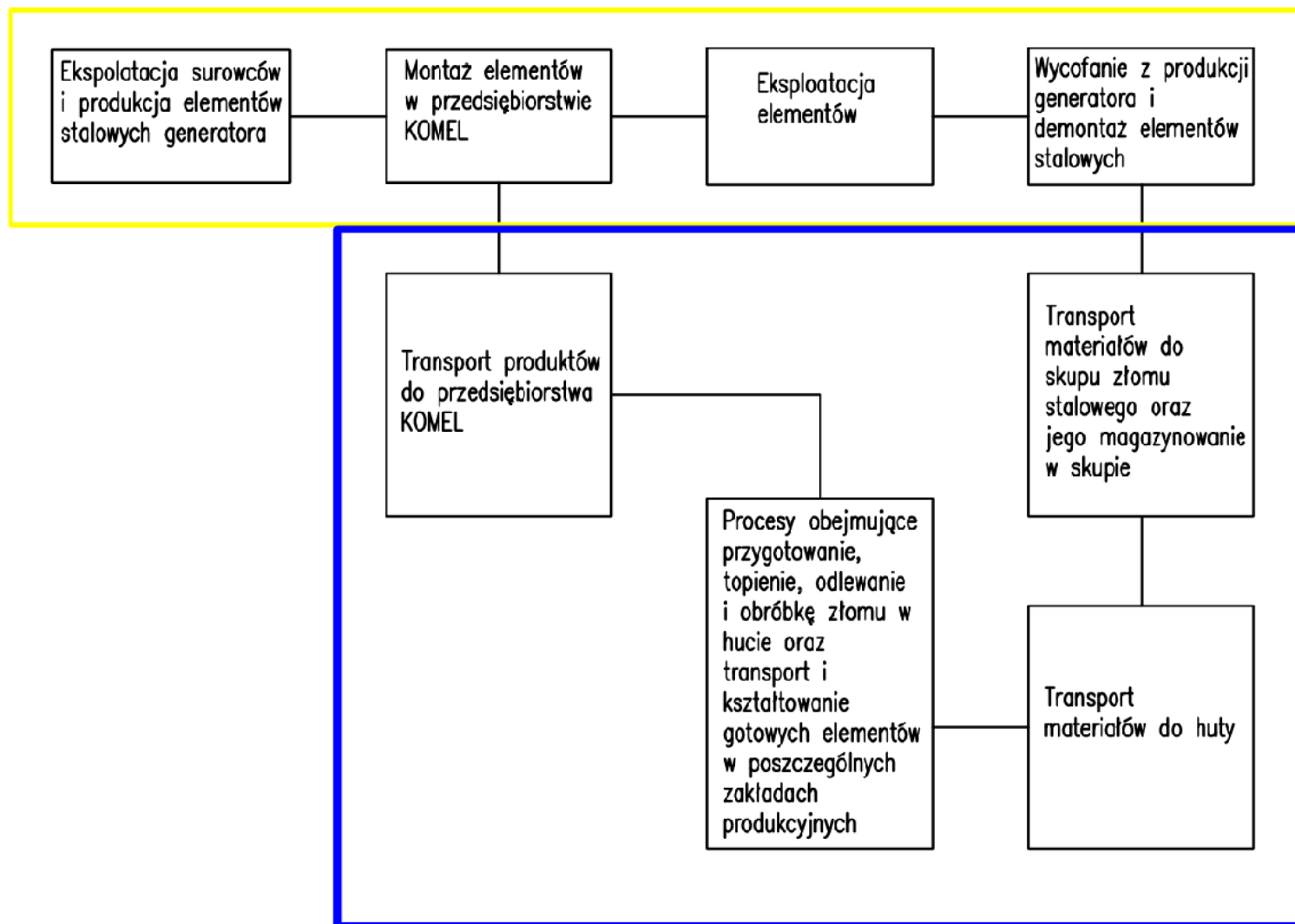
Stal i inne metale żelazne są materiałami, które są powszechnie zbierane oraz poddawane recyklingowi. Recykling stali ze względów ekonomicznych oraz szerokie zastosowanie stali w przemyśle jest bardzo dobrze rozwinięty. Złom stalowy jest skupowany, przetapiany i wykorzystywany do produkcji nowych elementów stalowych [94].

Opracowana analiza LCA zakłada obliczenie wartości śladu węglowego procesów związanych z recyklingiem elementów stalowych (kolor niebieski) i wpływu na zmniejszenie wartości dla procesów związanych z produkcją elementów z surowca pierwotnego (kolor żółty) (Rys.55).

Zakres analizy obejmuje:

- transport elementów stalowych do skupu złomu,
- procesy metalurgiczne oraz produkcyjne,
- transport gotowych produktów do przedsiębiorstwa KOMEL.

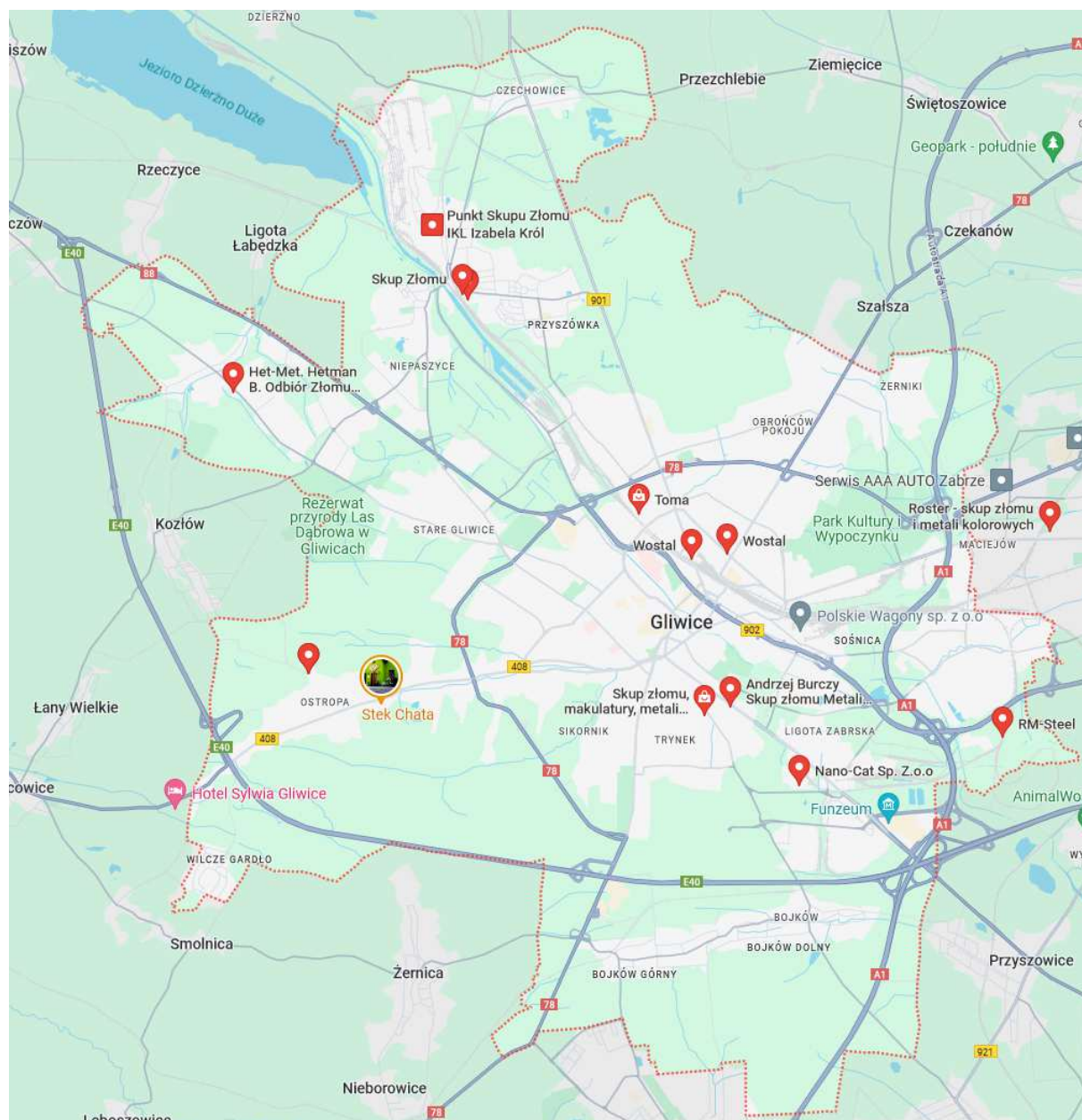
W założeniu recykling obejmuje 100% wszystkich elementów stalowych generatora, które ponownie zostają wykorzystane.



Rys.55. Schemat LCA recyklingu stali [opracowanie własne]

Transport elementów stalowych do skupu złomu

Transport odbywać się będzie od stacji demontażu zlokalizowanej w Gliwicach do najbliższego skupu złomu. W obrębie miasta znajduje się wiele punktów prowadzących skup metali żelaznych (elementy stalowe), metali nieżelaznych (miedź, aluminium), oraz makulatury (elementy papierowe) (Rys.56).



Rys.56. Lokalizacja skupu rozpatrywanych elementów generatora przeznaczonych do recyklingu [opracowanie własne]

Skupy elementów stalowych, tak jak stacja demontażu znajdują się w Gliwicach, a dystans pomiędzy nimi określono maksymalnie na 10 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związanego z transportem elementów stalowych generatora. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu

dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu, które pozwoli na transport 1017,0 kg materiałów. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na masę elementów stalowych z jednego generatora (62,31 kg) (obejmujący transport do składowiska oraz powrót do stacji demontażu) wynosi 0,22 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.14) [85].

Transport złomu stalowego do huty

Złom ze skupu transportowany jest do Huty Katowice (Huta ArcelorMittal w Dąbrowie Górniczej), oddalonej o około 50 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, z wykorzystaniem kalkulatora EcoTransIT World [83]. Założono wykorzystanie do tego celu w pełni załadowanego pojazdu ciężarowego w klasie ładowności 26-40 t, spełniającego normy spalin na poziomie EURO 6. Dla zaproponowanego wariantu, wartość śladu węglowego wyniesie 0,026 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.15).

Procesy związane przetwarzaniem złomu stalowego w gotowe produkty

Na podstawie danych agencji „World Steel Association”, „European Steel Association (EUROFER)” oraz „The Carbon Trust” opracowano analizę procesów związanych z transformacją złomu w gotowy produkt stalowy [95–97]. Opracowana analiza zawiera również dane z zakresu wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów recyklingu złomu i produkcji nowych elementów stalowych [95–97].

Procesy te składają się z następujących etapów :

- przygotowanie złomu w hucie - sortowanie, cięcie i rozdrabnianie złomu,
- topienie złomu – energia związana z wykorzystaniem pieca w hucie,
- obróbka ciekłego metalu - rafinacja i homogenizacja ciekłej stali,
- odlewanie i walcowanie - energia związana z odlewaniem i walcowaniem stali,
- obróbka końcowa - obróbka termiczna i kontrola jakości,
- dystrybucja - emisje związane z transportem elementów stalowych,
- produkcja – formowanie, obróbka mechaniczna i powlekanie stali celem wyprodukowania konkretnego elementu stalowego,

Na podstawie analizy literaturowej[95–97], wartość śladu węglowego dla powyższych etapów w przeliczeniu na 1 kg złomu wynosi:

- przygotowanie złomu w hucie - 0,02 kg CO₂ eq
- topienie złomu - 0,2 kg CO₂ eq
- obróbka ciekłego metalu - 0,05 kg CO₂ eq
- odlewanie i walcowanie – 0,01 kg CO₂ eq
- obróbka końcowa – 0,01 kg CO₂ eq
- dystrybucja – 0,02 kg CO₂ eq
- produkcja – 0,12 kg CO₂ eq

Dane dotyczące wartości śladu węglowego przeliczono zgodnie z wykazaną masą złomu stalowego (62,31 kg) pochodzącego z analizowanego generatora (Tabela 12).

Tabela 12. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów produkcji elementów stalowych generatora pochodzących z recyklingu złomu [opracowanie własne]

Lp.	Etap produkcji elementów stalowych z recyklingu złomu	Wartość śladu węglowego [kg CO ₂ eq]
1.	Przygotowanie złomu w hucie	1,25
2.	Topienie złomu	12,46
3.	Obróbka ciekłego metalu	3,12
4.	Odlewanie i walcowanie	0,62
5.	Obróbka końcowa	0,62
6.	Dystrybucja	1,25
7.	Produkcja	7,48
Suma		26,8

Łączna wartość śladu węglowego dla tego etapu wyniesie 26,8 kg CO₂ eq.

Transport produktów handlowych do przedsiębiorstwa KOMEL

Zakłada się że produkcja elementów odbywa się w przedsiębiorstwie „Metalfer Polska” [98] (Bielsko-Biała), skąd następnie są transportowane do przedsiębiorstwa KOMEL. Dystans pomiędzy tymi punktami wynosi 57 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związaną z transportem gotowych elementów stalowych generatora. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na elementy stalowe z jednego generatora (62,31 kg) (obejmujący transport elementów do przedsiębiorstwa KOMEL oraz powrót do zakładu produkcyjnego) wynosi 1,22 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.16) [70].

Podsumowanie wartości śladu węglowego recyklingu elementów stalowych

Wartość śladu węglowego wynikająca z przyjętego procesu gospodarki odpadami:

+ 28,27 kg CO₂ eq

Uzyskana wartość redukcji śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

- 72,73 kg CO₂ eq (względem 101,0 kg CO₂ eq w przypadku wykorzystania surowców pierwotnych) – redukcja wartości śladu węglowego o 72,01 %

9.2.2. Recykling elementów aluminiowych

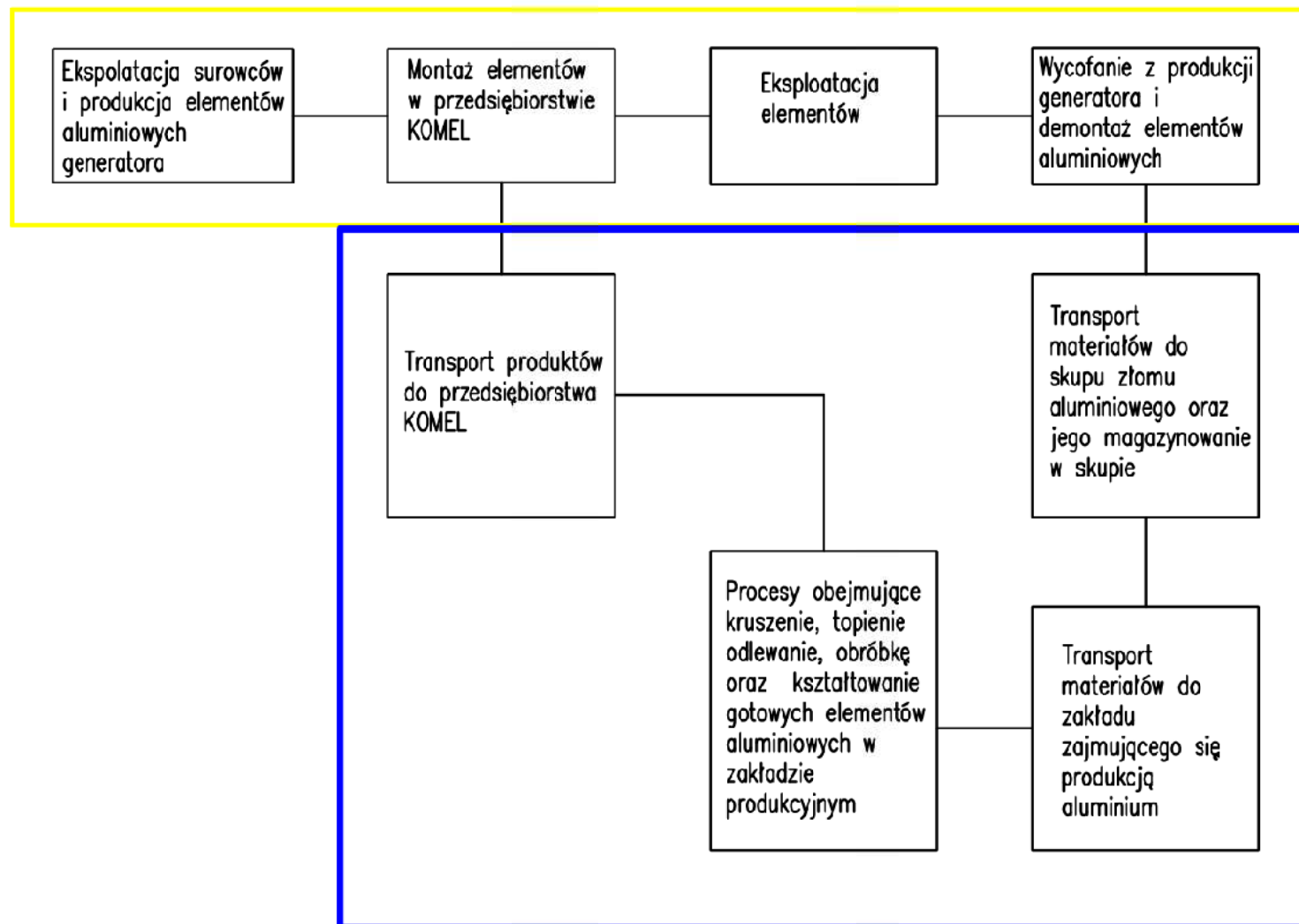
Aluminium, tak jak stal jest powszechnie poddawana recyklingowi w Polsce, co przyczynia się do znaczącej redukcji wpływu na środowisko. Proces jest szczególnie opłacalny, ponieważ recykling aluminium zużywa znacznie mniej energii w porównaniu do produkcji aluminium z surowców pierwotnych. Złom aluminiowy jest skupowany, kruszony, topiony, odlewany i formowany przy produkcji nowych elementów [99,100].

Opracowana analiza LCA zakłada obliczenie wartości śladu węglowego procesów związanych z recyklingiem elementów aluminiowych (kolor niebieski) i wpływu na zmniejszenie wartości śladu dla procesów związanych z produkcją elementów z surowca pierwotnego (kolor żółty) (Rys.57).

Zakres analizy obejmuje:

- transport elementów aluminiowych do skupu złomu,
- procesy przetwórcze oraz produkcyjne,
- transport gotowych produktów do przedsiębiorstwa KOMEL.

W założeniu recykling obejmuje 100% wszystkich elementów aluminiowych generatora, które ponownie zostają wykorzystane.



Rys.57. Schemat LCA recyklingu aluminium [opracowanie własne]

Transport elementów aluminiowych do skupu złomu

Transport tak jak w przypadku elementów stalowych odbywać się będzie od stacji demontażu zlokalizowanej w Gliwicach do najbliższego skupu aluminium (Rys.56).

Analogicznie jak dla elementów stalowych wyznaczono dystans pomiędzy stacją demontażu, a skupem (10 km), zastosowany środek transportu (samochód dostawczy Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km) oraz założenia (pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu) do obliczeń wartości śladu węglowego.

Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na masę elementów aluminiowych z jednego generatora (0,5065 kg) (obejmujący transport do składowiska oraz powrót do stacji demontażu) wynosi 0,002 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.17) [85].

Transport złomu aluminiowego do zakładu produkującego aluminium

Złom ze skupu transportowany jest do zakładu Grupa Kęty S.A. (Zakład w Kętach przetwarza złom aluminiowy) [101] oddalonej o około 87 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, z wykorzystaniem kalkulatora EcoTransIT World [83]. Zakłada się wykorzystanie do tego celu w pełni załadowanego pojazdu ciężarowego w klasie ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 6. Dla zaproponowanego wariantu, wartość śladu węglowego wyniesie 0,0035kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.18).

Procesy związane przetwarzaniem złomu aluminiowego w gotowe produkty

Na podstawie danych agencji “European Aluminium” oraz „International Aluminium” opracowano analizę procesów związanych z transformacją złomu w gotowy produkt aluminiowy [102,103]. Opracowana analiza zawiera również dane z zakresu wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów recyklingu złomu i produkcji nowych elementów stalowych [102,103].

Procesy te składają się z następujących etapów :

- przygotowanie złomu – sortowanie i segregacja,
- kruszenie i rozdrabnianie – energia elektryczna związana z wykorzystaniem maszyn,
- usuwanie zanieczyszczeń - techniki mechaniczne, chemiczne lub termiczne,
- topienie złomu – energia związana z wykorzystaniem pieca,
- rafinacja - rafinacja elektrochemiczna lub chemiczna,
- odlewanie - energia związana z odlewaniem aluminium,
- walcowanie i formowanie – nadanie pożądanego kształtu,

Na podstawie analizy literaturowej [102,103], wartość śladu węglowego dla powyższych etapów w przeliczeniu na 1 kg złomu wynosi:

- przygotowanie złomu - 0,02 kg CO₂ eq
- kruszenie i rozdrabnianie - 0,1 kg CO₂ eq
- usuwanie zanieczyszczeń- 0,1 kg CO₂ eq
- topienie złomu - 0,5 kg CO₂ eq
- rafinacja - 0,07 kg CO₂ eq

- odlewanie – 0,2 kg CO₂ eq
- walcowanie i formowanie 0,1 kg CO₂ eq

Dane dotyczące wartości śladu węglowego przeliczono zgodnie z wykazaną masą złomu aluminiowego (0,5065 kg) pochodzącego z analizowanego generatora (Tabela 13).

Tabela 13. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów produkcji elementów aluminiowych generatora pochodzących z recyklingu złomu [opracowanie własne]

Lp.	Etap produkcji elementów aluminiowych z recyklingu złomu	Wartość śladu węglowego [kg CO ₂ eq]
1.	Przygotowanie złomu	0,01
2.	Kruszenie i rozdrabnianie	0,026
3.	Usuwanie zanieczyszczeń	0,026
4.	Topienie złomu	0,25
5.	Rafinacja	0,035
6.	Odelewanie	0,101
7.	Walcowanie i formowanie	0,026
Suma		0,474

Łączna wartość śladu węglowego dla tego etapu wyniesie 0,474 kg CO₂ eq.

Transport produktów handlowych do przedsiębiorstwa KOMEL

Zakłada się że produkcja elementów odbywa się w przedsiębiorstwie „Grupa Kęty” (Kęty), skąd następnie są transportowane do przedsiębiorstwa KOMEL. Dystans pomiędzy dwoma punktami wynosi 62,7 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związaną z transportem gotowych elementów aluminiowych generatora. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na elementy aluminiowe z jednego generatora (0,5065 kg) (obejmujący transport elementów do przedsiębiorstwa KOMEL oraz powrót do zakładu produkcyjnego) wynosi 0,011 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.19) [85].

Podsumowanie wartości śladu węglowego recyklingu elementów aluminiowych

Wartość śladu węglowego wynikają z przyjętego procesu gospodarki odpadami:

+ 0,4905 kg CO₂ eq

Uzyskana wartość redukcji śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

- 2,3795 kg CO₂ eq (względem 2,87 kg CO₂ eq w przypadku wykorzystania surowców pierwotnych) - redukcja wartości śladu węglowego o 82,91 %

9.2.3. Recykling tworzyw sztucznych

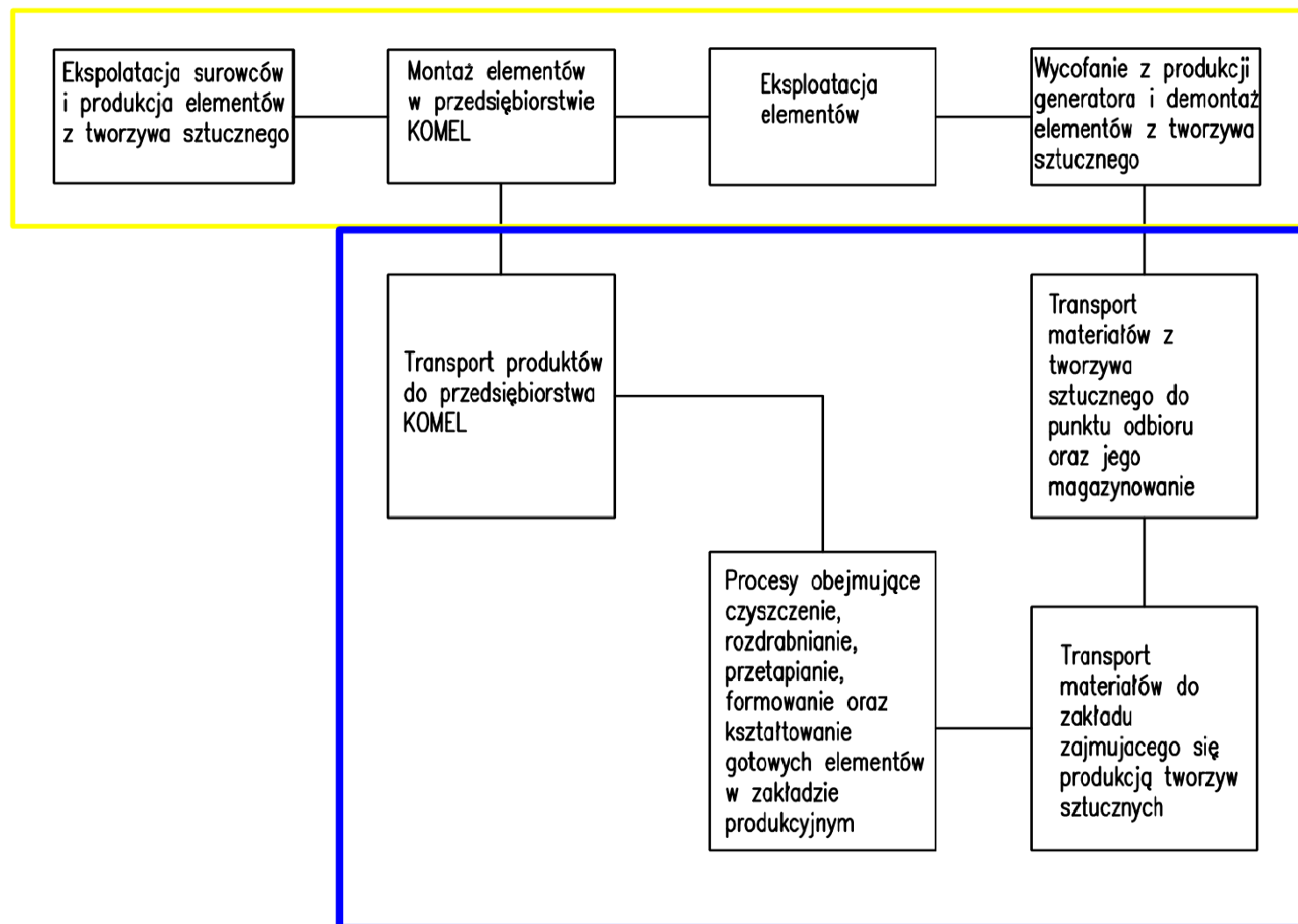
W Polsce recykling tworzyw sztucznych jest organizowany i zarządzany przez różne instytucje, mające na celu zwiększenie odzysku oraz ponownego wykorzystania plastików. Zużyte tworzywa sztuczne są zbierane, rozdrabniane, przetapiane i wykorzystywane do produkcji nowych produktów [104,105].

Opracowana analiza LCA zakłada obliczenie wartości śladu węglowego procesów związanych z recyklingiem tworzyw sztucznych (kolor niebieski) i wpływu na zmniejszenie wartości dla procesów związanych z produkcją z surowca pierwotnego (kolor żółty) (Rys.58).

Zakres analizy obejmuje:

- transport tworzywa sztucznego do punktu odbioru,
- procesy technologiczne oraz produkcyjne,
- transport gotowych produktów do przedsiębiorstwa KOMEL.

W założeniu recykling obejmuje 100% wszystkich elementów z tworzywa sztucznego generatora, które ponownie zostają wykorzystane.



Rys.58. Schemat LCA recyklingu tworzyw sztucznych [opracowanie własne]

Transport elementów z tworzywa sztucznego do punktu odbioru

Transport tak jak w przypadku poprzednich elementów odbywać się będzie od stacji demontażu zlokalizowanej w Gliwicach do najbliższego skupu tworzyw sztucznych (Rys.56).

Analogicznie jak dla poprzednich elementów wyznaczono dystans pomiędzy stacją demontażu, a skupem (10 km), zastosowany środek transportu (samochód dostawczy Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km) oraz założenia (pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu) do obliczeń wartości śladu węglowego.

Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na masę tworzyw sztucznych z jednego generatora (0,363 kg) (obejmujący transport do składowiska oraz powrót do stacji demontażu) wynosi 0,0012 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.20) [85].

Transport wycofanego z eksploatacji tworzywa do zakładu produkującego elementy z tworzywa sztucznego

Tworzywa sztuczne ze skupu transportowane są do zakładu „Duława Thermoplastic ” (Zakład w Skoczowie) [106] oddalonego o około 64 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, z wykorzystaniem kalkulatora EcoTransIT World [83]. Zakłada się wykorzystanie do tego celu w pełni załadowanego pojazdu ciężarowego w klasie ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 6. Dla zaproponowanego wariantu, wartość śladu węglowego wyniesie 0,002 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.21).

Procesy związane przetwarzaniem tworzyw sztucznych w gotowe produkty

Na podstawie danych literaturowych „Vlasopoulos, Antonis, et al. “Life cycle assessment of plastic waste and energy recovery” oraz danych agencji “Plastic Europe” oraz „Ellen MacArthur Foundation” opracowano analizę procesów związanych z transformacją tworzywa w gotowy produkt [107–109]. Opracowana analiza zawiera również dane z zakresu wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów recyklingu i produkcji nowych elementów z tworzywa sztucznego [107–110].

Procesy te składają się z następujących etapów:

- przygotowanie – sortowanie i segregacja,
- czyszczenie – usunięcie zanieczyszczeń i materiału obcego,
- rozdrabnianie i granulacja – energia elektryczna związana z wykorzystaniem maszyn,
- przetapianie i formowanie – energia związana z wykorzystaniem pieca.

Na podstawie analizy literaturowej [107–110], wartość śladu węglowego dla powyższych etapów w przeliczeniu na 1 kg tworzywa wynosi:

- przygotowanie - 0,1 kg CO₂ eq,
- czyszczenie - 0,2 kg CO₂ eq,
- rozdrabnianie i granulacja - 0,5 kg CO₂ eq,
- przetapianie i formowanie - 0,4 kg CO₂ eq.

Dane dotyczące wartości śladu węglowego przeliczono zgodnie z wykazaną masą tworzywa sztucznego (0,363 kg) pochodzącego z analizowanego generatora (Tabela 14).

Tabela 14. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów produkcji elementów z tworzywa sztucznego generatora pochodzących z recyklingu [opracowanie własne]

Lp.	Etap produkcji elementów z tworzywa sztucznego z recyklingu	Wartość śladu węglowego [kg CO ₂ eq]
1.	Przygotowanie	0,036
2.	Czyszczenie	0,073
3.	Rozdrabnianie i granulacja	0,181
4.	Przetapianie i formowanie	0,145
Suma		0,435

Łączna wartość śladu węglowego dla tego etapu wyniesie 0,435 kg CO₂ eq.

Transport produktów handlowych do przedsiębiorstwa KOMEL

Zakłada się że produkcja elementów odbywa się w przedsiębiorstwie „Duława Thermoplastic” (Skoczów), skąd następnie są transportowane do przedsiębiorstwa KOMEL. Dystans pomiędzy dwoma punktami wynosi 80,1 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego związaną z transportem gotowych elementów z tworzywa sztucznego. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na tworzywa sztuczne z jednego generatora (0,363 kg) (obejmujący transport elementów do przedsiębiorstwa KOMEL oraz powrót do zakładu produkcyjnego) wynosi 0,01 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.22) [85].

Podsumowanie wartości śladu węglowego recyklingu elementów z tworzywa sztucznego

Wartość śladu węglowego wynikająca z przyjętego procesu gospodarki odpadami:
+ 0,448 kg CO₂ eq

Uzyskana redukcja wartości śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

- 0,292 kg CO₂ eq (względem 0,74 kg CO₂ eq w przypadku wykorzystania surowców pierwotnych) - redukcja wartości śladu węglowego o 39,46%

9.2.4. Recykling miedzi

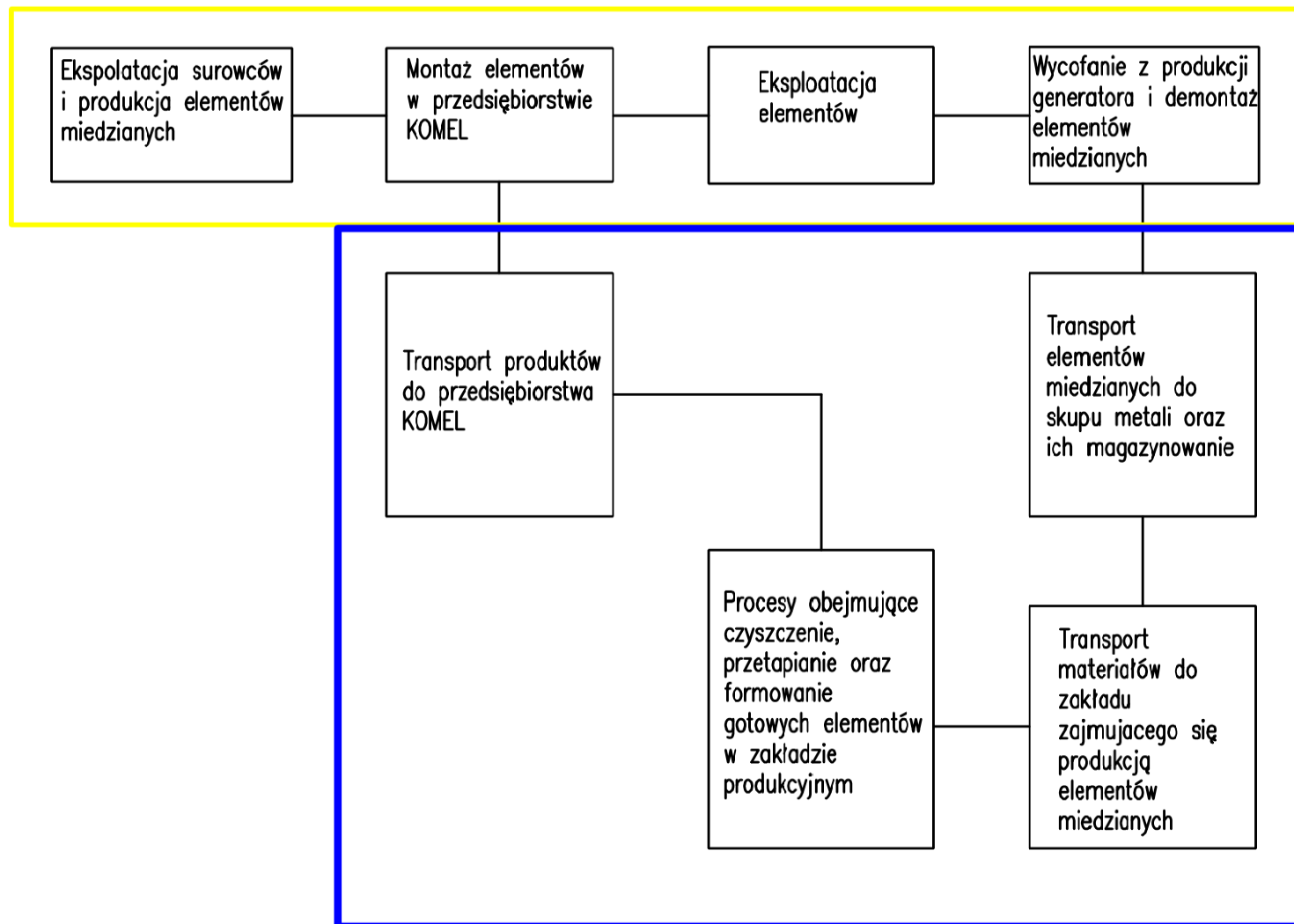
Recykling miedzi jest również powszechny, ponieważ miedź jest wartościowym surowcem, który można wielokrotnie przetwarzać bez utraty jakości. Wycofane z eksploatacji elementy miedziane są zbierane, sortowane, czyszczone, przetapiane, formowane i wykorzystywane do produkcji nowych produktów [111].

Opracowana analiza LCA zakłada obliczenie wartości śladu węglowego procesów związanych z recyklingiem miedzi (kolor niebieski) i wpływu na zmniejszenie wartości dla procesów związanych z produkcją z surowca pierwotnego (kolor żółty) (Rys.59).

Zakres analizy obejmuje:

- transport elementów miedzianych do skupu metali,
- procesy technologiczne oraz produkcyjne,
- transport gotowych produktów do przedsiębiorstwa KOMEL.

W założeniu recykling obejmuje 100% wszystkich elementów miedzianych generatora, które ponownie zostają wykorzystane.



Rys.59. Schemat LCA recyklingu elementów miedzianych [opracowanie własne]

Transport elementów miedzianych do skupu metali

Transport tak jak w przypadku poprzednich elementów odbywać się będzie od stacji demontażu zlokalizowanej w Gliwicach do najbliższego skupu metali (Rys.56).

Analogicznie jak dla poprzednich elementów wyznaczono dystans pomiędzy stacją demontażu, a skupem (10 km), zastosowany środek transportu (samochód dostawczy Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km) oraz założenie pełnego wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu do obliczeń wartości śladu węglowego.

Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na masę elementów miedzianych z jednego generatora (4,39 kg) (obejmujący transport do składowiska oraz powrót do stacji demontażu) wynosi 0,015 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.23) [85].

Transport złomu miedziowego do zakładu produkującego

Elementy miedziane ze skupu, transportowane są do zakładu „Metalurgia S.A. Radomsko” (Zakład w Radomsku) [112] oddalonego o około 135 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, z wykorzystaniem kalkulatora EcoTransIT World [83]. Zakłada się wykorzystanie do tego celu w pełni załadowanego pojazdu ciężarowego w klasie ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 6. Dla zaproponowanego wariantu, wartość śladu węglowego wyniesie 0,051 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.24).

Procesy związane przetwarzaniem złomu miedziowego w gotowe produkty

Na podstawie danych literaturowych „Lu, Yan, and Zhenming Xu. “Precious metals recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspective.” Resources, Conservation and Recycling” oraz danych agencji “International Copper Association” oraz „International Copper Study Group” opracowano analizę procesów związanych z transformacją złomu miedziowego w gotowy produkt [113–115]. Opracowana analiza zawiera również dane z zakresu wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów recyklingu i produkcji nowych elementów wykonanych z miedzi [113–115].

Procesy te składają się z następujących etapów :

- czyszczenie i przygotowanie – usunięcie zanieczyszczeń i segregacja,
- topienie i rafinacja – zużycie energii elektrycznej związanej z wykorzystaniem pieca,
- formowanie i produkcja – formowanie przetopionej miedzi.

Na podstawie analizy literaturowej [113–115], wartość śladu węglowego dla powyższych etapów w przeliczeniu na 1 kg miedzi wynosi:

- czyszczenie i przygotowanie - 0,07 kg CO₂ eq
- topienie i rafinacja - 0,5 kg CO₂ eq
- formowanie i produkcja - 0,2 kg CO₂ eq

Dane dotyczące wartości śladu węglowego przeliczono zgodnie z wykazaną masą elementów miedzianych (4,39 kg) pochodzących z analizowanego generatora (Tabela 15).

Tabela 15. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów produkcji elementów miedzianych generatora pochodzących z recyklingu [opracowanie własne]

Lp.	Etap produkcji elementów miedzianych z recyklingu złomu	Wartość śladu węglowego [kg CO ₂ eq]
1.	Czyszczenie i przygotowanie	0,307
2.	Topienie i rafinacja	2,195
3.	Formowanie i produkcja	0,878
Suma		3,38

Łączna wartość śladu węglowego dla tego etapu wyniesie 3,38 kg CO₂ eq.

Transport produktów handlowych do przedsiębiorstwa KOMEL

Zakłada się że produkcja elementów odbywa się w przedsiębiorstwie „Metalurgia S.A. Radomsko” (Radomsko), skąd następnie elementy te są transportowane do przedsiębiorstwa KOMEL. Dystans pomiędzy dwoma punktami wynosi 122 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związana z transportem gotowych elementów miedzianych. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na elementy miedziane z jednego generatora (4,39 kg) (obejmujący transport elementów do przedsiębiorstwa KOMEL oraz powrót do zakładu produkcyjnego) wynosi 0,18 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.25) [85].

Podsumowanie wartości śladu węglowego recyklingu elementów miedzianych

Wartość śladu węglowego wynikająca z przyjętego procesu gospodarki odpadami:

+ 3,626 kg CO₂ eq

Uzyskana redukcja wartości śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

- 3,914 kg CO₂ eq (względem 7,54 kg CO₂ eq w przypadku wykorzystania surowców pierwotnych) - redukcja wartości śladu węglowego o 51,91 %

9.2.5. Recykling papieru

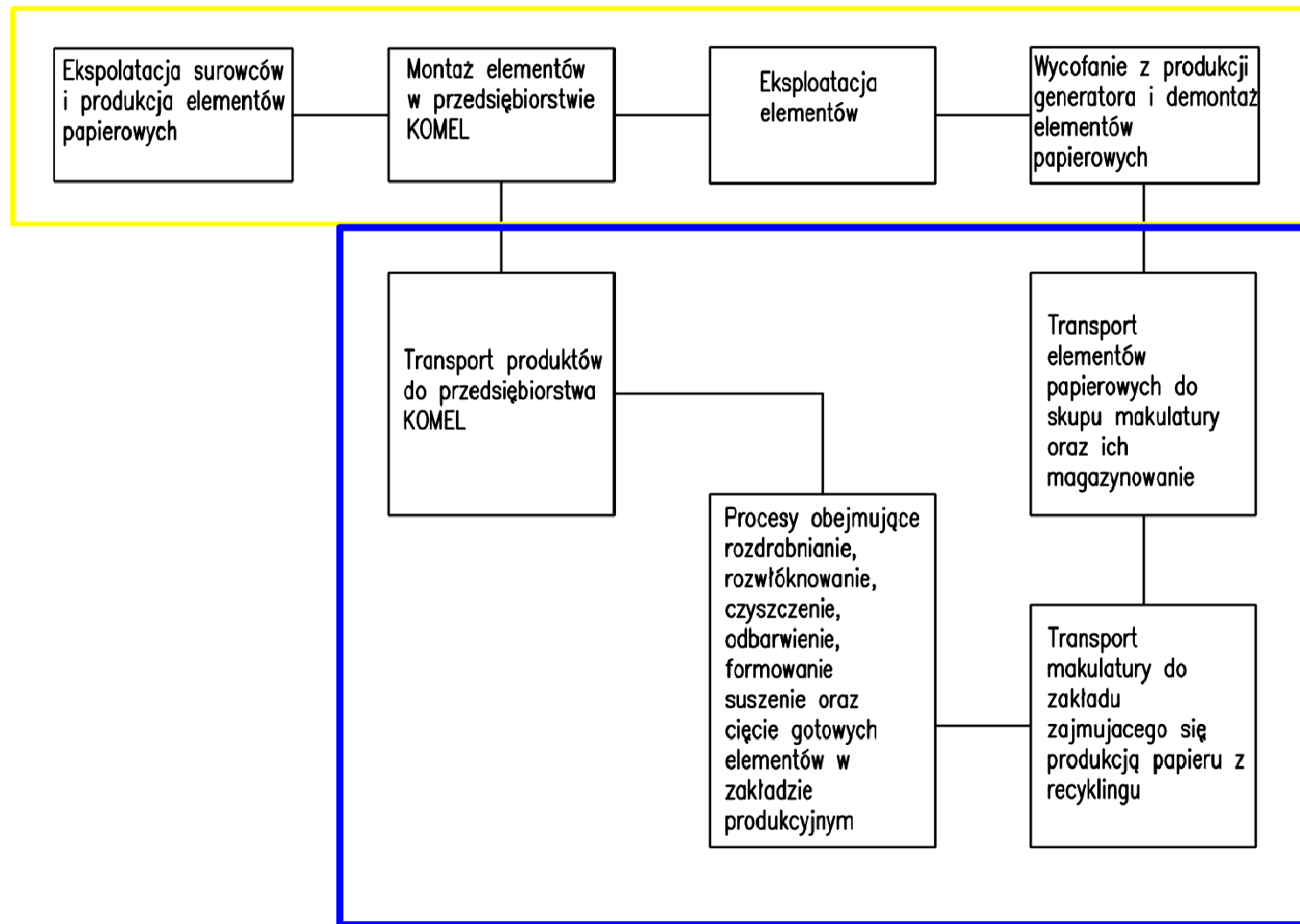
Papier również jest jednym z materiałów najczęściej poddawanych recyklingowi w Polsce. Stosuje się go do produkcji nowego papieru, kartonów i innych produktów papierniczych. Wycofane z eksploatacji elementy papierowe są zbierane, sortowane, rozdrabniane, czyszczone, suszone, formowane, cięte i wykorzystywane do produkcji nowych produktów [116].

Opracowana analiza LCA zakłada obliczenie wartości śladu węglowego procesów związanych z recyklingiem papieru (kolor niebieski) i wpływu na zmniejszenie wartości śladu dla procesów związanych z produkcją z surowca pierwotnego (kolor żółty) (Rys.60).

Zakres analizy obejmuje:

- transport elementów papierowych do skupu makulatury,
- procesy technologiczne oraz produkcyjne,
- transport gotowych produktów do przedsiębiorstwa KOMEL.

W założeniu recykling obejmuje 100% wszystkich elementów papierowych generatora, które ponownie zostają wykorzystane.



Rys.60. Schemat LCA recyklingu elementów papierowych [opracowanie własne]

Transport papieru do skupu makulatury

Transport tak jak w przypadku poprzednich elementów odbywać się będzie od stacji demontażu zlokalizowanej w Gliwicach do najbliższego skupu (Rys.56).

Analogicznie jak dla poprzednich elementów wyznaczono dystans pomiędzy stacją demontażu, a skupem (10 km), zastosowany środek transportu (samochód dostawczy Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km) oraz założenia (pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu) do obliczenia wartości śladu węglowego.

Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na masę elementów papierowych z jednego generatora 0,171 kg) (obejmujący transport do składowiska oraz powrót do stacji demontażu) wynosi 0,0006 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.26) [85].

Transport makulatury do zakładu produkującego

Elementy papierowe ze skupu makulatury, transportowane są do zakładu „Tektura Opakowania Papier SA” (Zakład w Tychach) [117] oddalonego o około 43 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, z wykorzystaniem kalkulatora EcoTransIT World [83]. Zakłada się wykorzystanie do tego celu w pełni załadowanego pojazdu ciężarowego w klasie ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 6. Dla zaproponowanego wariantu, wartość śladu węglowego wyniesie 0,00054 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.27).

Procesy związane przetwarzaniem makulatury w gotowe produkty

Na podstawie danych agencji “International Paper”, „Environmental Protection Agency” oraz danych literaturowych J. Laurijssen i inni „Paper and biomass for energy?: The impact of paper recycling on energy and CO₂ emissions” opracowano analizę procesów związanych z transformacją makulatury w gotowy produkt [118–120]. Opracowana analiza zawiera również dane z zakresu wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów recyklingu i produkcji nowych papierowych elementów [118–120].

Procesy te składają się z następujących etapów :

- rozdrabnianie i rozwłóknianie – rozdrabnianie papieru i rozwłóknianie w wodzie,
- czyszczenie i usuwanie zanieczyszczeń – usunięcie materiału obcego,
- odbarwienie - usuwanie tuszy i barwników,
- formowanie i suszenie – formowanie i suszenie papieru,
- cięcie i pakowanie – końcowa obróbka papieru i przygotowanie do wysyłki.

Na podstawie analizy literaturowej [118–120], wartość śladu węglowego dla powyższych etapów w przeliczeniu na 1 kg papieru wynosi:

- rozdrabnianie i rozwłóknianie – 0,02 kg CO₂ eq,
- czyszczenie i usuwanie zanieczyszczeń – 0,09 kg CO₂ eq,
- odbarwienie - 0,1 kg CO₂ eq,
- formowanie i suszenie – 0,2 kg CO₂ eq,
- cięcie i pakowanie – 0,05 kg CO₂ eq.

Dane dotyczące wartości śladu węglowego przeliczono zgodnie z wykazaną masą elementów papierowych (0,171 kg) pochodzącego z analizowanego generatora (Tabela 16).

Tabela 16. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów produkcji elementów papierowych generatora pochodzących z recyklingu [opracowanie własne]

Lp.	Etap produkcji elementów miedzianych z recyklingu złomu	Wartość śladu węglowego [kg CO ₂ eq]
1.	Rozdrabnianie i rozwłóknianie	0,003
2.	Czyszczenie i usuwanie zanieczyszczeń	0,015
3.	Odbarwienie	0,017
4.	Formowanie i suszenie	0,034
5.	Cięcie i pakowanie	0,008
Suma		0,077

Łączna wartość śladu węglowego dla tego etapu wyniesie 0,077 kg CO₂ eq.

Transport produktów handlowych do przedsiębiorstwa KOMEL

Zakłada się że produkcja elementów odbywa się w przedsiębiorstwie „Tektura Opakowania Papier SA” (Tychy), skąd następnie są transportowane do przedsiębiorstwa KOMEL. Dystans pomiędzy dwoma punktami wynosi 18,2 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związaną z transportem gotowych elementów papierowych. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na papierowe elementy z jednego generatora (0,171 kg) (obejmujący transport elementów do przedsiębiorstwa KOMEL oraz powrót do zakładu produkcyjnego) wynosi 0,001 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.28) [85].

Podsumowanie wartości śladu węglowego recyklingu elementów papierowych

Wartość śladu węglowego wynikająca z przyjętego procesu gospodarki odpadami:

+ 0,079 kg CO₂ eq

Uzyskana redukcja wartości śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

- 0,04 kg CO₂ eq (względem 0,119 kg CO₂ eq w przypadku wykorzystania surowców pierwotnych) - redukcja wartości śladu węglowego o 33,61 %

Reasumując, zastosowanie elementów stalowych, aluminiowych, miedzianych, papierowych oraz tworzywa sztucznego z recyklingu przy produkcji nowego generatora, generuje łączny ślad węglowy o wartości 32,91 kg CO₂ eq. W porównaniu z produkcją tych elementów z surowców pierwotnych (112,27 kg CO₂ eq), **uzyskano redukcję wartości śladu węglowego o 79,35 kg CO₂ eq (redukcja wartości śladu węglowego o 70,69 %).**

9.3. Ponowne użycie zdemontowanych magnesów neodymowych

Kolejny scenariusz zakłada ponowne zastosowanie zdemontowanych magnesów neodymowych, z wycofanego z eksploatacji generatora. Opisywany wariant jest możliwy do realizacji, w związku z bardzo długą żywotnością magnesów (uzależniona od czynników środowiskowych, temperatury oraz zużycia mechanicznego – nawet powyżej 30 lat) [121].

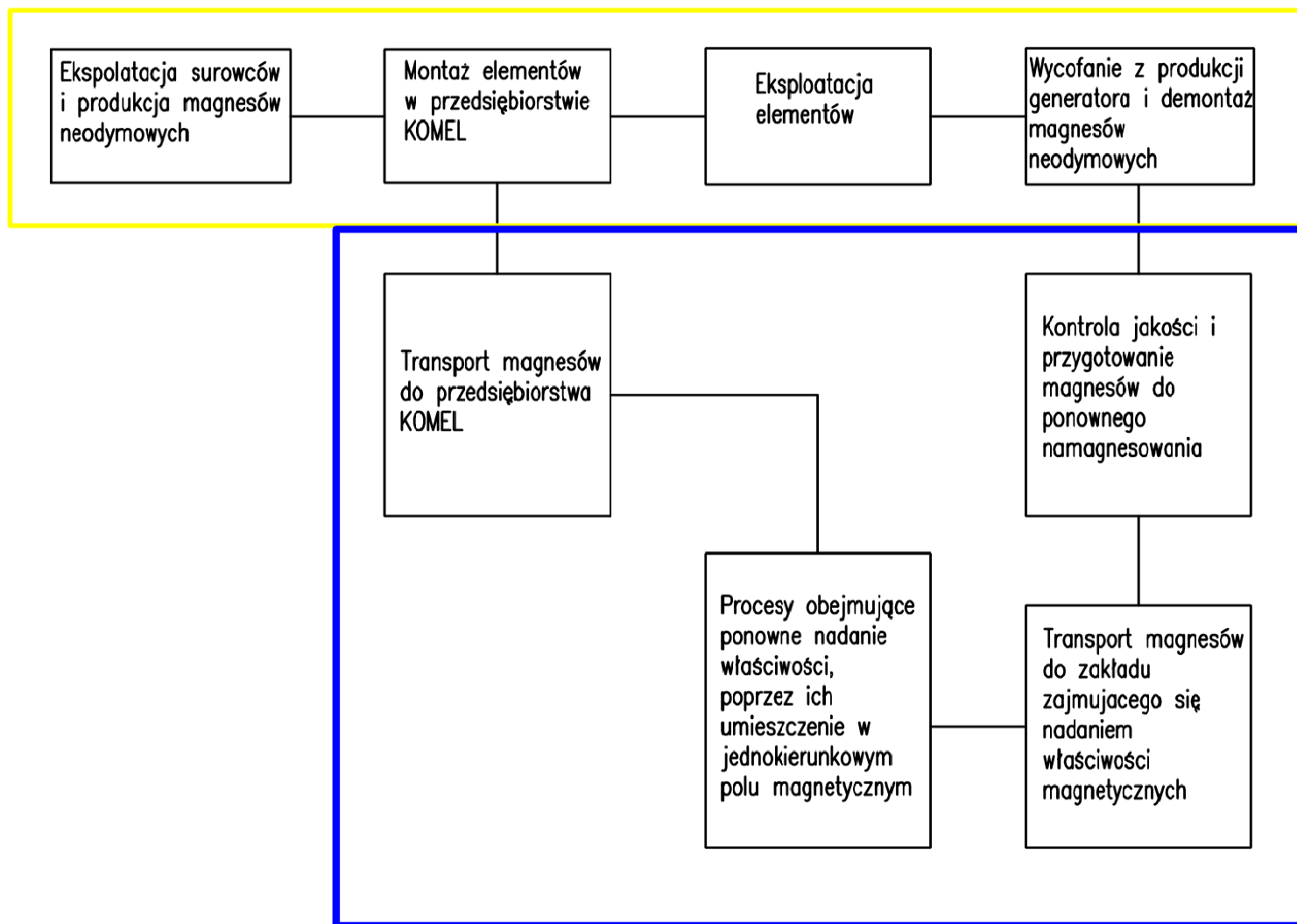
Opisywany scenariusz zakłada ponowne wykorzystanie magnesów neodymowych generatora wycofanego z użytkowania np. z powodu poważnego uszkodzenia mechanicznego generatora, które nie wpłynęło w żadnym stopniu na magnesy, a same magnesy były użytkowane w odpowiednich warunkach (bez narażenia na wysokie temperatury, wilgoć oraz uszkodzenia mechaniczne). W cyklu życia generatora na etapie demontażu magnesów neodymowych przeprowadzona została ich demagnetyzacja, celem ich uwolnienia z wału generatora. W związku z czym, przed ponownym użyciem koniecznym jest nadanie im ponownie właściwości magnetycznych.

Dla opracowanego scenariusza przeprowadzono analizę wartości śladu węglowego obejmującą kontrolę jakościową, ponowne nadanie właściwości magnetycznych, przygotowanie do ponownego zastosowania oraz transport do przedsiębiorstwa KOMEL. Celem realizowanych procesów uzyskanie produktu o tych samych parametrach jak bazowy (magnesy NdFeB z surowca pierwotnego) oraz obliczenie jak ponowne zastosowanie magnesów (kolor niebieski) (w stosunku do magnesów wyprodukowanego z surowców pierwotnych (kolor żółty)) jest w stanie obniżyć wartość śladu węglowego dla cyklu życia generatora (Rys.61).

W przeprowadzonej analizie wzięto pod uwagę ślad węglowy wynikający z:

- operacjami związanymi z kontrolą jakości i przygotowaniem zdemontowanych magnesów do ponownej magnetyzacji (obliczenia własne)
- transportem magnesów do jednostki zajmującej się nadaniem właściwości magnetycznych (obliczenia własne),
- operacjami związanymi z ponownym nadaniem właściwości magnetycznych (dane literaturowe) [122,123],
- transportem magnesów neodymowych do przedsiębiorstwa KOMEL.

Obliczenia uwzględniały recykling wszystkich magnesów z generatora (32 sztuki) o łącznej masie 1,984 kg.



Rys.61. Schemat LCA ponownego zastosowania magnesów NdFeB [opracowanie własne]

Operacje kontrolno-przygotowawcze zdemontowanych magnesów NdFeB

Na podstawie własnych badań opracowano analizę procesów związanych z przygotowaniem magnesów neodymowych (pozyskanych w wycofanego z eksploatacji generatora) do ponownego namagnesowania. Procesy te składają się z następujących etapów:

- oczyszczanie – usunięcie zanieczyszczeń (rdza, pozostałości kleju oraz innych substancji obcych),
- kontrola wizualna – weryfikacja ewentualnych uszkodzeń mechanicznych,

Założenia do obliczeń wartości śladu węglowego:

Obliczenia wartości śladu węglowego związanego z operacjami z tym etapem bazowały na następujących założeniach oraz parametrach:

- zużycie energii elektrycznej – zużycie energii elektrycznej związanej z oświetleniem, potrzebami socjalnymi pracowników oraz wykorzystywanej energii elektrycznej do operacji kontrolno-przygotowawczych (m.in. zastosowanie elektronarzędzi),
- zużycie energii ciepłej – uśredniona wartość z całego roku, reprezentująca zużycie energii ciepłej wykorzystywanej do ogrzewania pomieszczeń oraz hali produkcyjnej,
- emisję związane z dojazdem pracowników do stacji demontażu – emisje gazów wynikające z dojazdu pracowników samochodami.

Na podstawie badań wykazano, że oczyszczenie oraz kontrola wizualna magnesów z jednego generatora zajmuje jeden dzień pracy (około 8h), angażując dwóch pracowników. Założono, że średnio każdy z pracowników ma do przebycia dystans związany z dostaniem się do oraz z powrotem z pracy w odległości 10 km. Wykorzystywane do tego celu są samochody osobowe o średniej normie spalania EURO 6. Założono że stacja demontażu generatora to hala o powierzchni do 50 m² (stacja demontażu generatora). Zużycie energii elektrycznej oraz energii ciepłej obliczono w przeliczeniu na kWh i wynosi 1,5 kWh dla energia elektryczna oraz 19 kWh (0.068 GJ) dla energii ciepłej.

Wyniki obliczeń wartości śladu węglowego:

Założono, że operacje kontrolno-przygotowawcze (stacja demontażu) realizowane są w hali o powierzchni 50 m². Na podstawie powyższych założeń, uzyskano następujące wartości śladu węglowego:

- zużycie energii elektrycznej wynikające z wykorzystania elektronarzędzi, maszyn przemysłowych, oświetlenia pomieszczeń – 1,5 kWh. Przeliczając średnią wartość śladu węglowego wynikającą ze zużycia energii elektrycznej w Polsce (0,652 kg CO₂ eq na 1 kWh [90]), wartość ta wynosi 0,978 kg CO₂ eq,
- zużycie energii ciepłej wynikające z ogrzewania pomieszczeń/ hali produkcyjnej zakładu/ palnika (demontaż magnesów neodymowych z wały) – 19 kWh (przeliczono z wartości 0,068 GJ). W Polsce wartość śladu węglowego wynikająca z ogrzewania

sieciowego wynosi 96,5 kg CO₂ eq/GJ [90]. W przypadku stacji demontażu, wartość śladu węglowego wynikająca z ogrzewania wynosi 6,61 kg CO₂ eq.

- zużycie paliwa wynikające z dojazdu i powrotu z pracy przez 2 pracowników – zakładając średni dystans do pokonania przez każdego z pracowników wynoszący 10 km (łącznie 20 km przez wszystkich z pracowników). Przy obliczeniach spalania bazowano na modelu Skoda Octavia 1.6 CR TDI 105 km norma spalin EURO 6 (wykorzystywany do obliczeń etapu demontażu generatora). Model tego pojazdu emituje dwutlenek węgla na poziomie 140,085 g/km [85]. Przy powyższych założeniach łączna emisja wyniesie 2,8017 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.29).

Łączna wartość śladu węglowego powstała w wyniku operacji kontrolno-przygotowawczych wynosi 15,44 kg CO₂ eq.

Transport magnesów do procesu ponownego namagnesowania

Przygotowane magnesy, transportowane są do zakładu „PZK Brno” (oddział w Sosnowcu) [124] oddalonego o około 38 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związaną z transportem. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na magnesy z jednego generatora (1,984 kg) (obejmujący transport elementów do zakładu „PZK Brno” oraz powrót do stacji demontażu) wynosi 0,025 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.30) [85].

Ponowne nadanie właściwości magnetycznych magnesom

Na podstawie danych literaturowych Chen, Zhi Hua, et al. “Study on quantitative pulse magnetization of NdFeB” oraz Novák, Miroslav, and Želmíra Ferková. “Two-pulse magnetization process of the NDFEB multi-pole ring magnet for BLDC Motors” opracowano analizę procesów związanych z ponownym namagnesowaniem magnesów NdFeB [122,123]. Autorzy badań w swoich opracowaniach wykorzystują metodę „magnesowanie impulsowe”, które jest wykorzystywane do recyklingu magnesów neodymowych (poprzez ich ponowne namagnesowanie) [122,123,125].

Na podstawie danych literaturowych i opisanych w nich procesach obliczono wartość śladu węglowego namagnesowania magnesów NdFeB. W obliczeniach wartości śladu węglowego uwzględniono wyłącznie zużycie energii elektrycznej, wynikające z wykorzystywanych procesów laboratoryjnych oraz związanej z użytkowaniem laboratorium. Pozostałe procesy są na tyle marginalne, że nie zostały uwzględnione (wartość śladu węglowego rozkłada się na inne procesy które są prowadzone równocześnie np. dojazd pracowników) [122–124].

Proces namagnesowania impulsowego wykorzystuje cewkę elektromagnetyczną do wytworzenia pola magnetycznego w krótkim czasie (impuls). Magnes neodymowy poddawany jest działaniu tego pola magnetycznego. Pole magnetyczne o wysokim natężeniu, wpływa na domeny magnetyczne w magnesie, wyrównując je w kierunku pola, co skutkuje

namagnesowaniem magnezu. Czas trwania namagnesowania pojedynczego magnezu (pochodzącego z małego generatora) trwa bardzo krótko (kilka sekund). Proces ten wiąże się ze zużyciem energii elektrycznej (dla 1 kg magnesów NdFeB) na poziomie 0,5 kWh [122–124].

Przeliczając zużycie energii elektrycznej na podstawie masy magnesów neodymowych przeznaczonych do namagnesowania (1,984 kg), wynosi 0,992 kWh. Przeliczając średnią wartość śladu węglowego w Polsce wynoszącą 0,652 kg CO₂ eq na 1 kWh [90], wartość śladu węglowego dla tego procesu wynosi 0,647 kg CO₂ eq.

Transport magnesów neodymowych do przedsiębiorstwa KOMEL.

Zakłada się że ponowne namagnesowanie odbywa się w przedsiębiorstwie „PZK Brno” (Sosnowiec), skąd następnie są transportowane do przedsiębiorstwa KOMEL. Dystans pomiędzy dwoma punktami wynosi 3,2 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związanego z transportem gotowych magnesów neodymowych. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na magnesy neodymowe z jednego generatora (1,984 kg) (obejmujący transport elementów do przedsiębiorstwa KOMEL oraz powrót do zakładu produkcyjnego) wynosi 0,0001 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.31) [85].

Podsumowanie wartości śladu węglowego związanego z ponownym namagnesowaniem magnesów

Wartość śladu węglowego wynikająca z przyjętego procesu gospodarki odpadami:

+ 16,112 kg CO₂ eq

Uzyskana redukcja wartości śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

- 137,912 kg CO₂ eq (względem 154,024 kg CO₂ eq w przypadku wykorzystania surowców pierwotnych) - redukcja wartości śladu węglowego o 89,54%

Reasumując, ponowne wykorzystanie magnesów (przy założeniu że w czasie eksploatacji oraz demontażu nie uległy zniszczeniu) znacząco obniża wartość śladu węglowego (w porównaniu do analogicznych magnesów wyprodukowanych z surowca pierwotnego).

Niestety trzeba mieć na uwadze, że żywotność magnesów neodymowych w pewnym momencie się kończy (około kilkadziesiąt lat, w przypadku zapewnienia odpowiednich warunków w cyklu życia). Wariant związany z ponownym wykorzystaniem magnesów neodymowych najlepiej się sprawdza dla generatorów, które uległy przedwczesnej awarii, która nie uszkodziła zawartych w nich magnesów neodymowych.

9.4. Recykling magnezów neodymowych

W tym scenariuszu przeprowadzono symulację recyklingu magnezów neodymowych, z wycofanego z eksploatacji generatora. Recykling magnezów polega na zastosowaniu dwóch wariantów:

- odzysk pierwiastków ziem rzadkich i zastosowaniu ich do produkcji nowego magnezu,
- odzysk wszystkich składników użytkowych magnezów i zastosowaniu ich do produkcji nowego magnezu, w oparciu o bezodpadową technologię wykorzystującą druk 3D.

Opisywane scenariusze bazują na magnesach pozyskanych w wyniku demontażu generatora. W ramach scenariuszy przeprowadzono analizę wartości śladu węglowego obejmujące transport magnezów, operacje technologiczne oraz produkcyjne, których celem jest odzysk składników użytecznych zawartych w magnesach.

Obliczenia uwzględniały recykling wszystkich magnezów z generatora (32 sztuki) o łącznej masie 1,984 kg.

Na Świecie prowadzone są intensywne prace nad odzyskiem REE z magnezów neodymowych i produkcji nowych magnezów NdFeB (głównie opracowania w skali laboratoryjnej [126,127]. W Polsce, również nie ma jednostki zajmującej się recyklingiem magnezów neodymowych.

W pierwszym scenariuszu założono, że procesy związane z recyklingiem magnezów, prowadzone będą w przedsiębiorstwie „Elemental Strategic Metals” (Zawiercie). Wybór przedsiębiorstwa wynika z opracowanej i wdrożonej technologii związanej z recyklingiem elektroniki wyposażonej w magnesy NdFeB oraz założoną przez przedsiębiorstwo strategią rozwoju (produkcja nowych magnezów z recyklingu) [128].

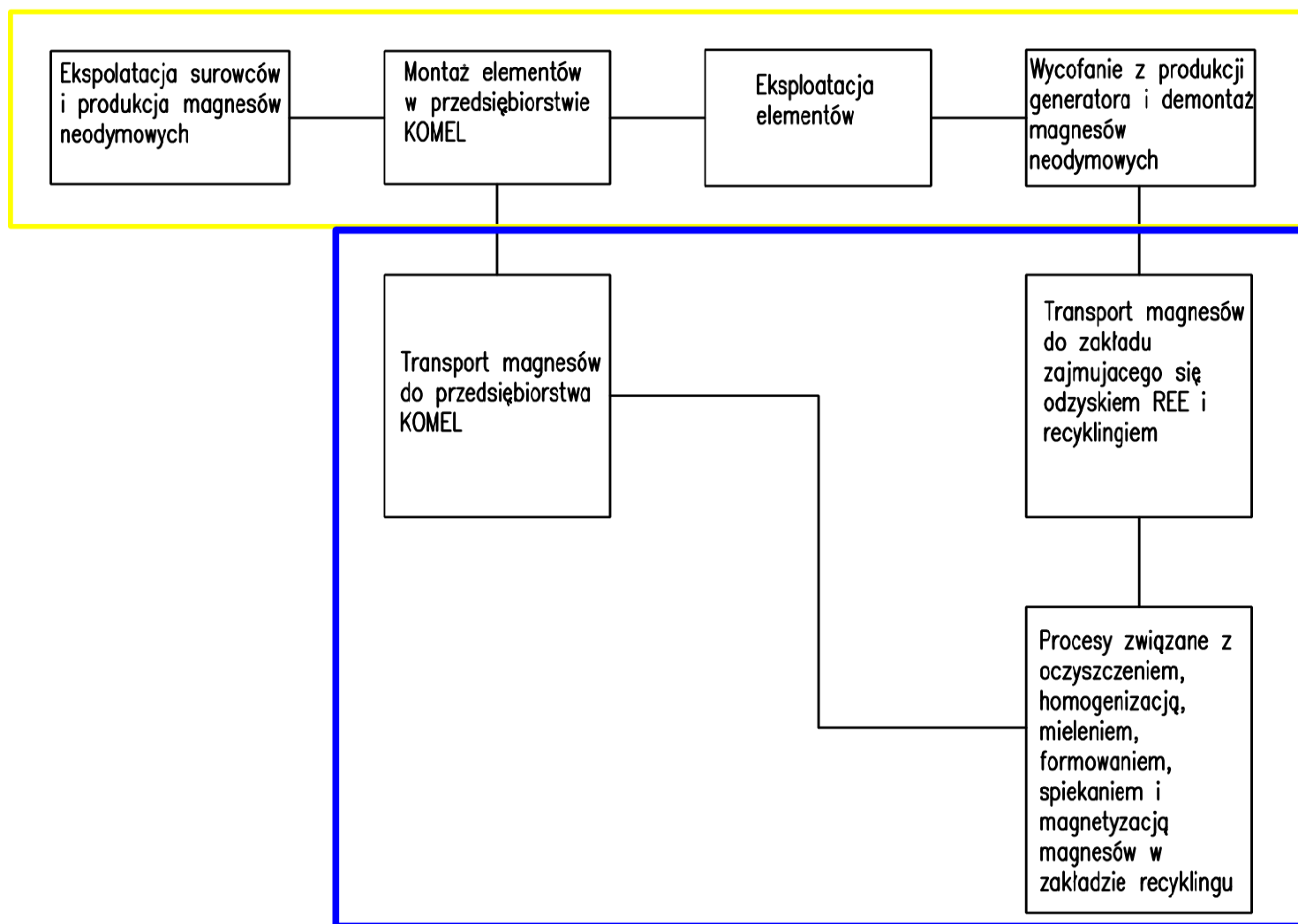
W drugim scenariuszu, na podstawie danych literaturowych założono, że recykling i produkcja nowych magnezów prowadzona jest w Ispringen (Niemcy) [129,130].

9.4.1. Odzysk pierwiastków ziem rzadkich (REE) z magnezów neodymowych

Dla opracowanego scenariusza przeprowadzono analizę wartości śladu węglowego obejmującą transport magnezów przeznaczonych do recyklingu, procesy związane z odzyskiem REE i procesy produkcyjne magnezów oraz transport do przedsiębiorstwa KOMEL. Celem realizowanych procesów jest uzyskanie produktu o tych samych parametrach jak bazowy (magnesy NdFeB z surowca pierwotnego) oraz obliczenie jak ponowne zastosowanie magnezów (kolor niebieski) (w stosunku do magnezów wyprodukowanego z surowców pierwotnych (kolor żółty)) jest w stanie obniżyć wartość śladu węglowego dla cyklu życia generatora (Rys.62).

W przeprowadzonej analizie wzięto pod uwagę wartość śladu węglowego, wynikającą z:

- transportu magnezów do przedsiębiorstwa zajmującego recyklingiem magnezów neodymowych (obliczenia własne),
- operacjami związanymi z odzyskiem pierwiastków ziem rzadkich i produkcją nowego magnezu z recyklingu (dane literaturowe) [126,127],
- transportu magnezów neodymowych do przedsiębiorstwa KOMEL.



Rys.62. Schemat LCA odzysku REE i recyklingu magnesów NdFeB [opracowanie własne]

Transport magnezów do zakładu recyklingu magnezów

Magnezy transportowane są do zakładu „Elemental Strategic Metals” (Zakład w Zawierciu) [128] oddalonego o około 74 km od stacji demontażu. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związanego z transportem. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na magnez z jednego generatora (1,984 kg) (obejmująca transport elementów do zakładu „Elemental Strategic Metals” oraz powrót do stacji demontażu) wynosi 0,5 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.32) [85].

Procesy związane z odzyskiem REE i recyklingiem magnezów

W większości metod recyklingu magnezów proces zaczyna się od pozbycia się właściwości magnetycznych. W przypadku analizowanych magnezów właściwości te zostały wyeliminowane podczas demontażu. Kolejny krok koncentruje się na odzysku metali, z głównym naciskiem na neodym [131].

Na podstawie wiedzy literaturowej oraz doświadczeniach Jin H. et al. zawartych w artykule „Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling” [44], obliczono wartość śladu węglowego związanego z recyklingiem magnezów. W scenariuszu założono, że wszystkie operacje prowadzone są w zakładzie „Elemental Strategic Metals”.

Metodą wykorzystywaną do prowadzenia recyklingu jest metoda „magnet-to-magnet”, która umożliwia recykling i ponowne wykorzystanie REE (neodym, dysproz i prazeodym) do produkcji nowych magnezów. Magnez pochodzący z demontażu jest oczyszczany z zanieczyszczeń oraz oczyszczany z powłoki ochronnej. Magnez jest homogenizowany (z dodatkami pierwotnych składników) w reaktorze do mieszania wodoru oraz w procesie modyfikacji granicy ziaren. Powstały proszek poddawany jest dalszemu mieleniu oraz homogenizacji. Następnie magnez jest formowany i spiekany w blok NdFeB. Końcowy proces polega na cięciu bloku, powlekanii i magnetyzacji (tak jak w przypadku produkcji z surowca pierwotnego) [44].

Na tej podstawie wyznaczona została wartość śladu węglowego związana z produkcją magnezów NdFeB z recyklingu (wartości dla 1 kg magnezów) (Tabela 17) [44].

Tabela 17. Wyniki parametrów środowiskowych związanych z recyklingiem magnesów neodymowych (metoda magnet-to-magnet) [44].

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartość
1.	Globalne ocieplenie (wartość śladu węglowego)	kg CO₂ eq	12,453
2.	Zakwaszanie	H ⁺ moles eq	11,320
3.	Kancerogenność	benzen eq	0,035
4.	Toksyczność dla ludzi (nienowotworowa)	toluen eq	136,075
5.	Wpływ na układ oddechowy	kg PM2.5 eq	0,059
6.	Eutrofizacja	kg N eq	0,004
7.	Niszczenie ozonu	kg CFC-11 eq	4,89E-07
8.	Ekotoksyczność	kg 2,4-D eq	45,345
9.	Smog	kg NOX eq	0,034

Z powyższych danych wynika, że produkcja 1 kg magnesów NdFeB odpowiada za powstanie śladu węglowego o wartości 12,453 kg CO₂ eq.

Demontaż generatora wykazał udział masowy magnesów neodymowych wynoszący 1984,0 g. Przeliczając proporcjonalnie powyższe dane literaturowe, wartość śladu węglowego związana z recyklingiem magnesów NdFeB pochodzących z demontowanego generatora, wynosi 24,7 kg CO₂ eq.

Transport magnesów neodymowych do przedsiębiorstwa KOMEL.

Procesy związane z odzyskiem oraz recyklingiem magnesów prowadzone są w przedsiębiorstwie „Elemental Strategic Metals” (Zawiercie), skąd następnie są transportowane do przedsiębiorstwa KOMEL. Dystans pomiędzy dwoma punktami wynosi 38,8 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związanego z transportem gotowych magnesów neodymowych. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na magnesy neodymowe z jednego generatora (1,984 kg) (obejmujący transport elementów do przedsiębiorstwa KOMEL oraz powrót do zakładu produkcyjnego) wynosi 0,26 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.33) [85].

Podsumowanie wartości śladu węglowego związanego z odzyskiem REE z magnesów i ich recyklingiem

Wartość śladu węglowego wynikająca z przyjętego procesu gospodarki odpadami:
+ 25,46 kg CO₂ eq

Uzyskana redukcja wartości śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

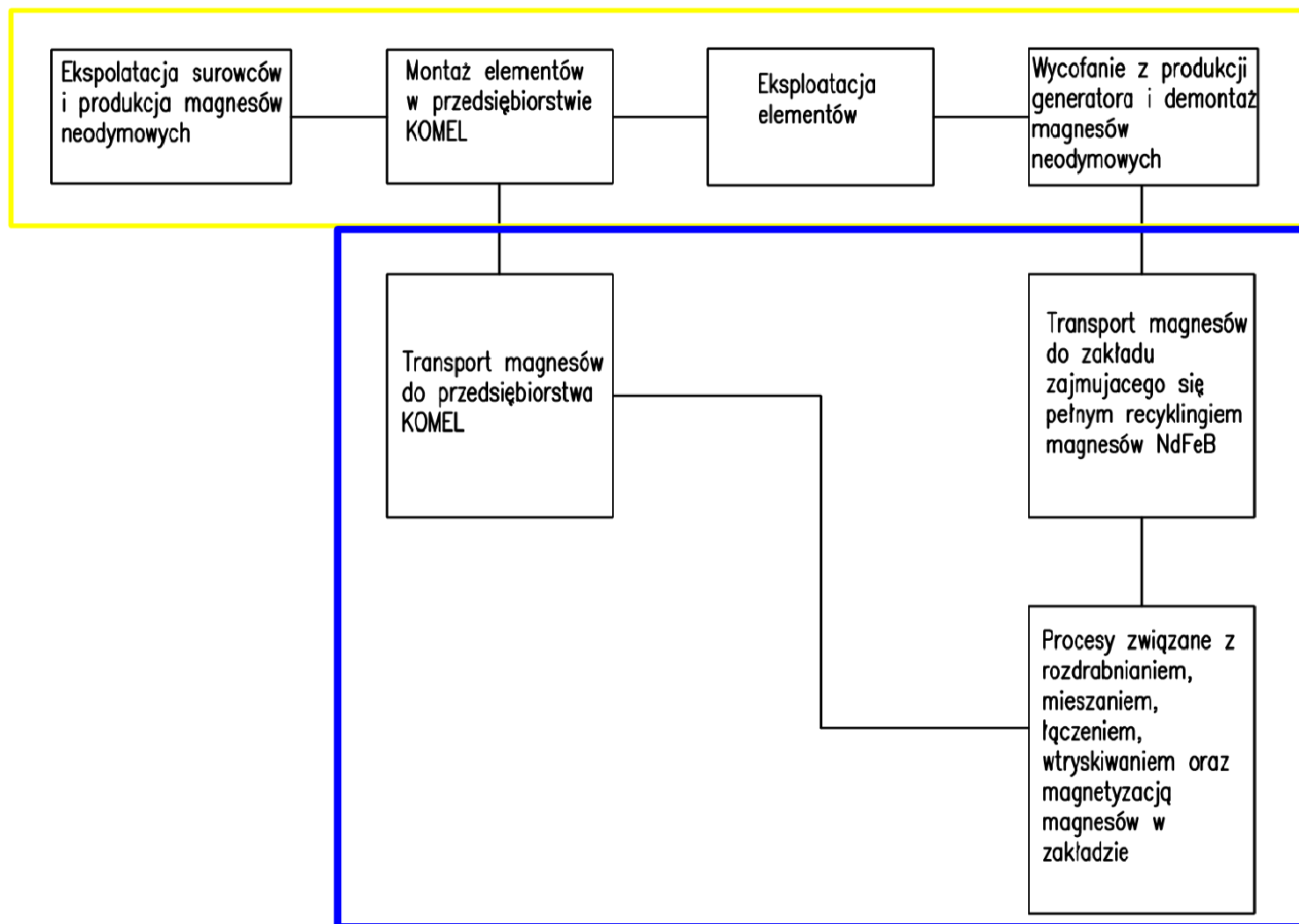
- 128,56 kg CO₂ eq (względem 154,024 kg CO₂ eq w przypadku wykorzystania surowców pierwotnych) - redukcja wartości śladu węglowego o 83,47%

9.4.2. Odzysk wszystkich surowców z magnesów neodymowych

Drugi wariant odzysku oraz recyklingu magnesów neodymowych opiera się na podejściu SDS, wykorzystującej obróbkę wodorową złomu magnetycznego (HPMS), celem uzyskania w pełni bezodpadowej produkcji magnesów [129,130,132]. Dla opracowanego scenariusza przeprowadzono analizę wartości śladu węglowego obejmującą transport magnesów przeznaczonych do recyklingu, procesy związane z użycia surowców pochodzących w 100% z recyklingu do produkcji magnesów neodymowych oraz transport do przedsiębiorstwa KOMEL. Celem realizowanych procesów jest uzyskanie produktu o tych samych parametrach jak bazowy (magnesy NdFeB z surowca pierwotnego) oraz obliczenie jak ponowne zastosowanie magnesów (kolor niebieski) (w stosunku do magnesów wyprodukowanego z surowców pierwotnych (kolor żółty)) jest w stanie obniżyć wartość śladu węglowego dla cyklu życia generatora (Rys. 63).

W przeprowadzonej analizie wzięto pod uwagę wartość śladu węglowego wynikającą z:

- transportu magnesów do przedsiębiorstwa zajmującego recyklingiem magnesów neodymowych (obliczenia własne),
- operacjami związanymi z wykorzystaniem surowców pochodzących w 100% z recyklingu do produkcji magnesów neodymowych (dane literaturowe) [129,130],
- transportu magnesów neodymowych do przedsiębiorstwa KOMEL.



Rys.63. Schemat LCA recyklingu magnesów NdFeB [opracowanie własne]

Transport magnezów do zakładu recyklingu magnezów

Na podstawie danych literaturowych [129,130] i założeń scenariusza wariantu, magnesy transportowane są do zakładu w Ispringen (Niemcy) oddalonego o około 945 km od stacji demontażu. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związaną z transportem. Ze względu na międzynarodowy charakter transportu (znaczy dystans), w obliczeniach wartości śladu węglowego założono wykorzystanie samochodu ciężarowego. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem kalkulatora EcoTransIT World [83]. Zakłada się wykorzystanie do tego celu w pełni załadowanego pojazdu ciężarowego w klasie ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 6. Dla zaproponowanego wariantu, wartość śladu węglowego wyniesie 0,14 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.34).

Procesy związane z pełnym recyklingiem magnezów

Drugi z wariantów opiera się na recyklingu magnezów, poprzez połączenie drobnych cząsteczek zdemontowanego magnezu z klejem lub innym spoiwem i formowanie go w nowy magnes z wykorzystaniem technologii 3D [129,130,133].

Na podstawie badań przedstawionych w pracy „Life Cycle Assessment Benchmarking and Report for the SDS Manufacturing Method” (Projekt Horizon 2020 – REProMag) [129], obliczono wartość śladu węglowego związaną z recyklingiem magnezów. W scenariuszu założono, że wszystkie procesy odbywają się w zakładzie w Ispringen.

Zastosowanie w projekcie podejścia SDS, wykorzystującego obróbkę wodorową złomu magnetycznego (HPMS), pozwala na bezodpadową produkcję złożonych magnezów unikając przy tym kosztownej obróbki po spiekaniu. Analizowane procesy odbywają się w skali przemysłowej oraz laboratoryjnej, a sam materiał pochodzi w 100% z recyklingu. W niniejszej pracy założono zastąpienie złomu pochodzącego ze Szwecji złomem ze stacji demontażu w Gliwicach.

Do obliczenia wartości śladu węglowego uwzględniono wszystkie procesy produkcyjne zakładu. Polegają one na przygotowaniu materiału poprzez rozdrabnianie, rozkładem wodorowym, mieleniem oraz dodawanie spoiwa. Proszek następnie jest formowany z wykorzystaniem drukarki 3D (proces fotopolimeryzacji). Z powstałych form usuwane jest dodatkowe spoiwo (dodawane na etapie przygotowania) poprzez rozpuszczanie w wodzie oraz odspajanie termiczne (odparowanie). Następnie magnesy są powlekane (rozpuszczony nikiel) i namagnesowane [129].

Na tej podstawie wyznaczona została wartość śladu węglowego związana z produkcją magnezów NdFeB dla metody wykorzystującej druk 3D (wartości dla 1 kg magnezów) (Tabela 18) [129].

Tabela 18. Wyniki parametrów środowiskowych związanych z recyklingiem magnezów neodymowych (metoda wykorzystująca druk 3D) [129].

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartość
1.	Globalne ocieplenie (wartość śladu węglowego)	kg CO₂ eq	10,9
2.	Zubożenie warstwy ozonowej	Kg R11 eq	1.630x10E-10
3.	Kancerogenność	CTUh	1.46x10E-8
4.	Toksyczność dla ludzi (nienowotworowa)	CTUh	5,81x10 E-8
5.	Cząstki stałe	kg PM2.5 eq	2,45E-03
6.	Promieniowanie jonizujące	kBq U235 eq	1,26
7.	Fotochemiczne tworzenie ozonu	Kg NMVOC eq	1,37E-02
8.	Zakwaszenie	Mole H+eq	2,21E-02
9.	Eutrofizacja terenów lądowych	Mole N eq	5,81E-02
10.	Eutrofizacja wód śródlądowych	kg P eq	6,5E-05
11.	Eutrofizacja wód morskich	kg P eq	5,99E-03
12.	Toksyczność dla środowiska	CTUeco	2,09
13.	Wyczerpywanie zasobów wodnych	m ³ eq	1,64E+01
14.	Wyczerpywanie zasobów mineralnych, kopalnych i odnawialnych	kg Sb eq	5,86E-03

Z powyższych danych wynika, że produkcja 1 kg magnezów NdFeB jest odpowiadzana za ślad węglowy o wartości 10,9 kg CO₂ eq.

Demontaż generatora wykazał udział masowy magnezów neodymowych wynoszący 1984,0 g. Przeliczając proporcjonalnie powyższe dane literaturowe, wartość śladu węglowego związany z recyklingiem magnezów NdFeB pochodzących z demontowanego generatora, wynosi 19,84 kg CO₂ eq.

Transport magnezów neodymowych do przedsiębiorstwa KOMEL.

Procesy związane z odzyskiem oraz recyklingiem magnezów prowadzone są w przedsiębiorstwie w Ispringen, skąd następnie są transportowane do przedsiębiorstwa KOMEL. Dystans pomiędzy dwoma punktami wynosi 976 km. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem kalkulatora EcoTransIT World [83]. Zakłada się wykorzystanie do tego celu w pełni załadowanego pojazdu ciężarowego w klasie ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 6. Dla zaproponowanego wariantu, wartość śladu węglowego wyniesie 0,14 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.35).

Podsumowanie wartości śladu węglowego związanego z recyklingiem magnezów neodymowych

Wartość śladu węglowego wynikająca z przyjętego procesu gospodarki odpadami:
+ 19,98 kg CO₂ eq

Uzyskana redukcja wartości śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

- 134,044 kg CO₂ eq (względem 154,024 kg CO₂ eq w przypadku wykorzystania surowców pierwotnych) - redukcja wartości śladu węglowego o 87,03%

Reasumując, istnieje wiele metod recyklingu magnesów neodymowych, które znacząco obniżają wartość śladu węglowego, w porównaniu do analogicznych magnesów wyprodukowanych z surowca pierwotnego.

Wariant 2, opierający się na podejściu SDS, wykorzystującej obróbkę wodorową złomu magnetycznego (HPMS) i wydruk nowych magnesów przy wykorzystaniu technologii 3D, w najwyższym stopniu redukuje wartości śladu węglowego. Dodatkowo, zgodnie z informacjami literaturowymi zapewnia bezodpadowy proces produkcyjny.

9.5. Kompleksowy recykling wszystkich podzespołów generatora

Ostateczny wariant, który jest celem realizowanego doktoratu, jest zastosowanie kompleksowego recyklingu wszystkich podzespołów generatora. Pozwoli to na stworzenie nowego modelu cyklu życia generatora z magnesami neodymowymi, o mniejszym wpływie środowiskowym, który będzie posiadał niskie wartości śladu węglowego oraz wysokie wykorzystanie surowców wtórnych zgodnie z zasadą gospodarki obiegu zamkniętego.

W tym wariancie wykorzystane zostaną wcześniejsze obliczenia materiałów dla których w Polsce prowadzone są procesy związane z recyklingiem oraz wybrany scenariusz związany z recyklingiem magnesów neodymowych. Dodatkowo obliczona zostanie wartość śladu węglowego dla grup materiałowych dla których nie były prowadzone jeszcze analizy.

W obliczeniach wartości śladu węglowego dla kompleksowego recyklingu wszystkich podzespołów generatora, wykorzystano dotychczasowe obliczenia, dane literaturowe oraz bazy danych związane z poruszaną tematyką.

9.5.1. Wyniki uzyskanych redukcji wartości śladu węglowego dla dotychczas analizowanych grup materiałowych

Kompleksowy scenariusz obejmuje zaimplementowanie uzyskanych wyników wartości śladu węglowego dla wybranych grup materiałowych (materiały dla których w Polsce prowadzone są na szeroką skalę procesy związane z recyklingiem). Dotyczy to redukcji wartości śladu węglowego poprzez zastosowanie do ich produkcji, odpowiedników z recyklingu (w porównaniu do materiałów wyprodukowanych z surowca pierwotnego) (Tabela 19).

Tabela 19. Redukcja wartości śladu węglowego dla materiałów poddawanych powszechnie recyklingowi [opracowanie własne]

Lp.	Grupa materiałowa	Wartość śladu węglowego		
		Produkcja pierwotna [kg CO ₂ eq]	Produkcja z recyklingu [kg CO ₂ eq]	Uzyskana redukcja [kg CO ₂ eq / %]
1.	Elementy stalowe	101,0	28,27	72,73 / 72,01
2.	Elementy aluminiowe	2,87	0,4905	2,3795 / 82,91
3.	Tworzywa sztuczne	0,74	0,448	0,292 / 39,46
4.	Elementy miedziane	7,54	3,626	3,914 / 51,91
5.	Elementy papierowe	0,119	0,079	0,04 / 33,61
Suma		112,269	32,9135	79,36 / 70,69

Dla każdej z grup materiałowych, wykazano znaczącą redukcję wartości śladu węglowego przy zastosowaniu produkcji opartej na recyklingu produktów. Znaczący udział miały elementy stalowe, gdzie wartość śladu węglowego zredukowano o 72,73 kg CO₂ eq. W przypadku elementów aluminiowych udało się ograniczyć wartość śladu węglowego ponad pięciokrotnie (z 2,87 do 0,4905 kg CO₂ eq). Łączna redukcja dla wszystkich grup materiałów to 79,3555 kg CO₂ eq.

W przypadku magnesów neodymowych przeprowadzono szczegółową analizę związaną z możliwością ich ponownego zagospodarowania. Wybrano 3 scenariusze polegające na ich ponownym użyciu bądź zastosowaniu jednej z dwóch metod recyklingu. Celem analizy był wybór scenariusza pozwalającego na redukcję wartości śladu węglowego w porównaniu do magnesów wyprodukowanych z surowca pierwotnego (Tabela 20).

Tabela 20. Redukcja wartości śladu węglowego związana z zagospodarowaniem magnesów neodymowych [opracowanie własne]

Lp.	Scenariusz zagospodarowania magnesów neodymowych	Wartość śladu węglowego		
		Produkcja pierwotna [kg CO ₂ eq]	Produkcja z recyklingu [kg CO ₂ eq]	Uzyskana redukcja [kg CO ₂ eq / %]
1.	Ponowne użycie zdemontowanych magnesów	154,024	16,112	137,912 / 89,54
2.	Recykling w oparciu o odzysk pierwiastków ziem rzadkich		25,46	128,56 / 83,47
3.	Recykling wykorzystujący technologię druku 3D		19,98	134,044 / 87,03

Wariant związany z ponownym użyciem zdemontowanych magnesów obniża w znaczący sposób wartość śladu węglowego, natomiast sprawdza się tylko w przypadku generatorów, które uległy przedwczesnej awarii nie uszkadzając przy tym zawartych w nich magnesów neodymowych.

Porównując scenariusze związane z recyklingiem magnesów, w obu przypadkach uzyskano znaczącą redukcję wartości śladu węglowego (o 128,56 oraz 134,044 kg CO₂ eq). Pierwszy z nich skupia się na odzysku i ponownym wykorzystaniu pierwiastków ziem rzadkich, natomiast drugi (opierający się na podejściu SDS, wykorzystujących obróbkę wodorową złomu magnetycznego (HPMS) i wydruk nowych magnesów przy wykorzystaniu technologii 3D) zapewnia bezodpadowy proces recyklingu magnesów neodymowych.

W związku z powyższym, w ramach kompleksowego recyklingu generatora, zaimplementowano wariant związany z wykorzystaniem druku 3D.

9.5.2. Recykling pozostałych grup materiałowych

Dla pozostałych materiałów takich kleje i elementy gumowe brakuje szerokiej literatury dotyczącej recyklingu na szeroką skalę w Polsce. Wynika to z ich specyficznych właściwości i trudności w procesach recyklingu [134,135].

W związku z prowadzonymi badaniami z zakresu demontażu, uzyskano dodatkową grupę materiałów stanowiących mieszaninę tworzywa sztucznego oraz elementów miedzianych.

W niniejszej analizie przeprowadzono scenariusze związane z recyklingiem elementów gumowych, klejów oraz mieszaniny elementów miedzianych i tworzywa sztucznego.

W przeprowadzonej analizie wzięto pod uwagę wartość śladu węglowego wynikającą z:

- transportu materiałów do jednostki nadającej im ponowną przydatność,
- operacje związane z recyklingiem materiałów,
- transport materiałów do przedsiębiorstwa KOMEL.

Elementy gumowe

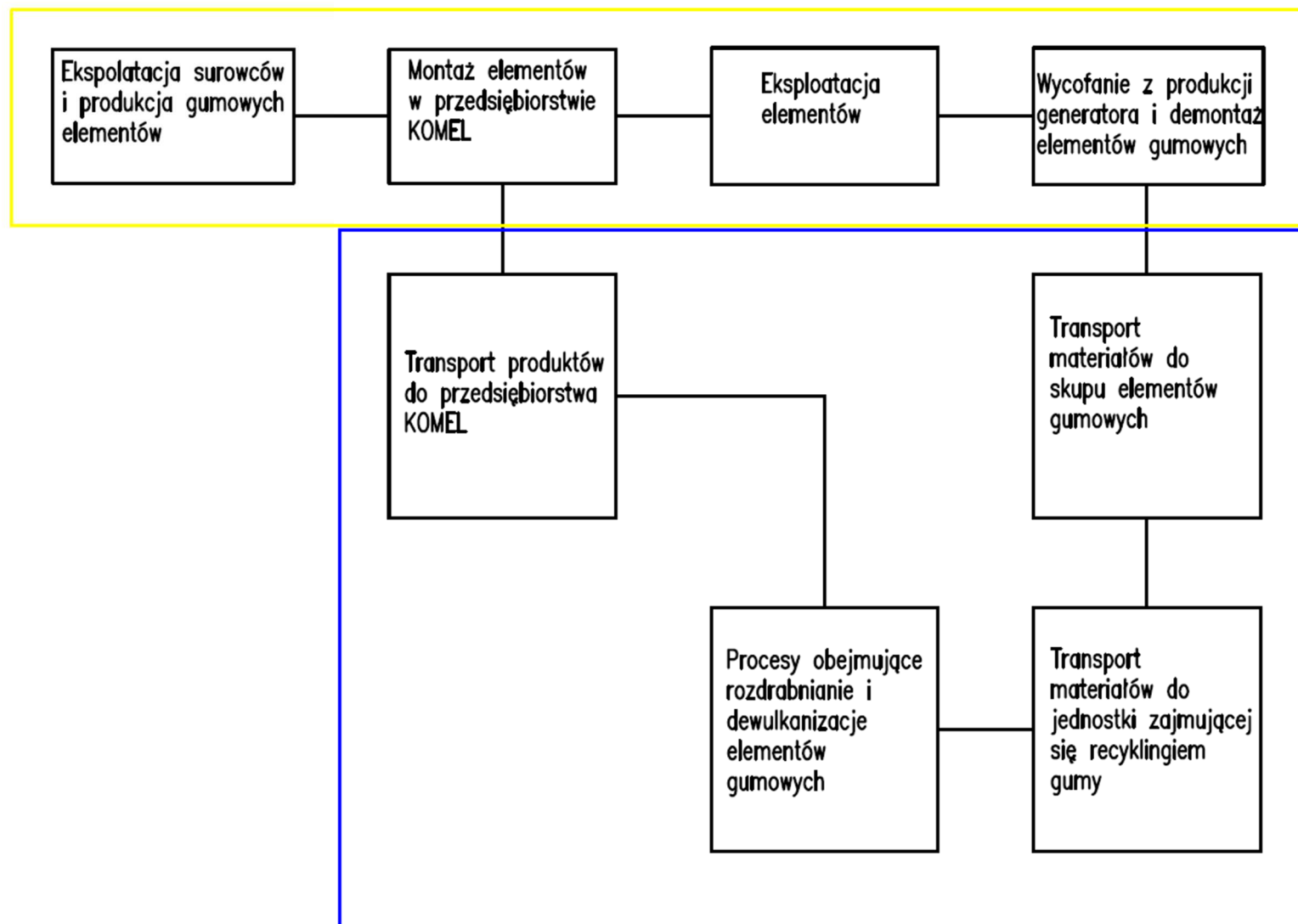
Elementy gumowe takie jak uszczelki czy opony, nie ulegają biodegradacji, są one najczęściej składowane lub spalane. Inne podejście związane jest z procesem przetwarzania, w którym elementy gumowe są zbierane, rozdrabniane, sortowane i dewulkanizowane w celu przekształcenia zużytej gumy w nowy produkt [136,137].

Opracowana analiza LCA zakłada obliczenie wartości śladu węglowego dla procesów związanych z recyklingiem elementów gumowych (kolor niebieski) i wpływu na zmniejszenie wartości śladu dla procesów związanych z produkcją z surowca pierwotnego (kolor żółty) (Rys.64).

Zakres analizy obejmuje:

- transport elementów gumowych do zakładu recyklingu,
- procesy technologiczne oraz produkcyjne,
- transport gotowych produktów do przedsiębiorstwa KOMEL.

W założeniu recykling obejmuje 100% wszystkich elementów gumowych generatora (o łącznej masie 0,038 kg), które ponownie zostają wykorzystane.



Rys.64. Schemat LCA recyklingu elementów gumowych [opracowanie własne]

Transport elementów gumowych do skupu

Transport tak jak w przypadku tworzyw sztucznych odbywać się będzie od stacji demontażu zlokalizowanej w Gliwicach do najbliższego skupu (Rys.56)

Analogicznie jak dla poprzednich elementów wyznaczono dystans pomiędzy stacją demontażu, a skupem (10 km), zastosowany środek transportu (samochód dostawczy Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km) oraz założenia (pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu) do obliczeń wartości śladu węglowego.

Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na masę elementów gumowych z jednego generatora (0,038 kg) (obejmujący transport do składowiska oraz powrót do stacji demontażu) wynosi 0,00013 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.36) [70].

Transport elementów gumowych do zakładu recyklingu

Elementy gumowe ze skupu, transportowane są do zakładu „Gran Tech” (Zakład w Sieniawie) [138] oddalonego o około 323 km. Jest to zakład który wytwarza nowe produkty w 100% pochodzące z recyklingu. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, z wykorzystaniem kalkulatora EcoTransIT World [85]. Zakłada się wykorzystanie do tego celu w pełni załadowanego pojazdu ciężarowego w klasie ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 6. Dla zaproponowanego wariantu ślad węglowy, jego wartość wyniesie 0,00091 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.37).

Procesy związane przetwarzaniem elementów gumowych w gotowe produkty

Na podstawie danych literaturowych autorstwa Rincón, Lúdia, et al. “Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative life cycle assessment oraz Dong, Yahong, et al. “Life cycle assessment of vehicle tires: A systematic review, zrealizowano etap związany z procesami przetwarzania elementów gumowych w gotowe produkty [139,140].

W ramach opracowań przeprowadzono analizy wpływu środowiskowego (w tym wartości śladu węglowego) związanych z recyklingiem elementów gumowych. Uwzględnione procesy związane są między innymi z kruszeniem mechanicznym czy kruszeniem kriogenicznym oraz procesami produkcyjnymi nowych elementów [139,140].

Na podstawie przeprowadzonych analiz poszczególnych metod recyklingu elementów gumowych (technologia sucha - zastąpienie kruszywa gumą, technologia mokra - guma jako środek modyfikujący), autorzy określili średnią wartość śladu węglowego dla tego procesu. Sumaryczna wartość śladu węglowego dla wszystkich procesów wynosi 667,0 kg CO₂ eq wycofanych z eksploatacji elementów gumowych (dla 1 tony elementów gumowych) [139,140].

Dane literaturowe dotyczące wartości śladu węglowego przeliczono zgodnie z wykazaną masą elementów gumowych (0,038 kg) pochodzącego z analizowanego generatora. Łączna wartość śladu dla tego etapu wyniesie 0,025 kg CO₂ eq.

Transport produktów handlowych do przedsiębiorstwa KOMEL

Zakłada się że produkcja elementów odbywa się w przedsiębiorstwie „Gran Tech” (Sieniawa), skąd następnie są transportowane do przedsiębiorstwa KOMEL. Dystans pomiędzy tymi dwoma punktami wynosi 291 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związaną z transportem gotowych elementów papierowych. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na elementy gumowe z jednego generatora (0,038 kg) (obejmujący transport elementów do przedsiębiorstwa KOMEL oraz powrót do zakładu produkcyjnego) wynosi 0,0037 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.38) [85].

Podsumowanie wartości śladu węglowego recyklingu elementów gumowych

Wartość śladu węglowego wynikająca z przyjętego procesu gospodarki odpadami:

+ 0,02974 kg CO₂ eq

Uzyskana redukcja wartości śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

- 0,08326 kg CO₂ eq (względem 0,113 kg CO₂ eq w przypadku wykorzystania surowców pierwotnych) - redukcja wartości śladu węglowego o 73,68%

Kleje

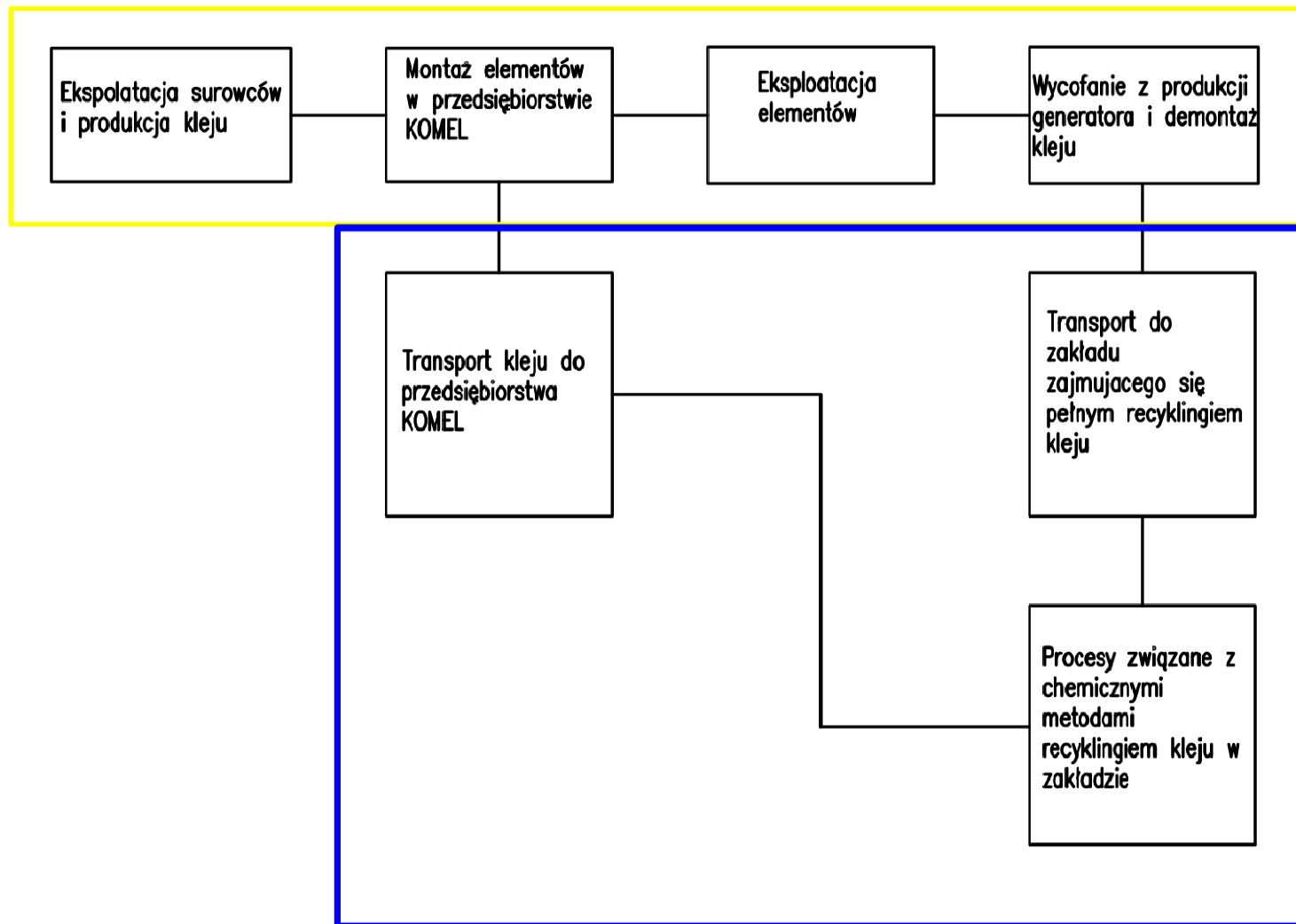
Recykling kleju przemysłowego wykorzystywanego do łączenia elementów generatora jest o wiele bardziej skomplikowany niż recykling pozostałych elementów generatora. Jest to związane ze złożonym składem chemicznym klejów i ich mocnym złączeniem z pozostałymi materiałami. Proces recyklingu wymaga zastosowania nowoczesnych technologii i metod pozwalających na pełny odzysk materiałów, w sposób przyjazny środowisku [141]. Procesy związane z przetworzeniem kleju wymagają recyklingu trzeciorzędowego poprzez recykling chemiczny lub recykling czwartorzędowy poprzez spalanie. W niniejszym scenariuszu założono zastosowaniem recyklingu chemicznego, pozwalającego na ponowne wykorzystanie kleju [142,143].

Opracowana analiza LCA zakłada obliczenie wartości śladu węglowego dla procesów związanych z recyklingiem kleju (kolor niebieski) i wpływu na zmniejszenie wartości śladu dla procesów związanych z produkcją z surowca pierwotnego (kolor żółty) (Rys.65).

Zakres analizy obejmuje:

- transport kleju do zakładu recyklingu,
- procesy technologiczne oraz produkcyjne,
- transport gotowych produktów do przedsiębiorstwa KOMEL.

W założeniu recykling obejmują 100% kleju znajdującego się w generatorze (o łącznej masie 0,005 kg), które ponownie zostają wykorzystane.



Rys.65. Schemat LCA recyklingu kleju [opracowanie własne]

Transport elementów kleju do skupu

Transport w tym scenariuszu również odbywać się będzie tak jak w przypadku elementów gumowych, od stacji demontażu zlokalizowanej w Gliwicach do najbliższego skupu (Rys.56) (założenie że te skupy zgodzą się na odbiór tego typu materiału).

Analogicznie jak dla poprzednich elementów wyznaczono dystans pomiędzy stacją demontażu, a skupem (10 km), zastosowany środek transportu (samochód dostawczy Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km) oraz założenia (pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu) do obliczeń wartości śladu węglowego.

Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na masę kleju z jednego generatora (0,005 kg) (obejmujący transport do składowiska oraz powrót do stacji demontażu) wynosi 0,000017 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.39) [85].

Transport kleju do zakładu recyklingu

Recykling klejów przemysłowych w Polsce oraz na Świecie ogranicza się do działań w skali laboratoryjnej. W związku z czym, w scenariuszu tego etapu wybrano zakład specjalizujący się w podobnej działalności (tworzywa sztuczne).

Założono że kleje z generatora transportowane są tak jak w przypadku tworzyw sztucznych, do zakładu „Duława Thermoplastic ” (Zakład w Skoczowie) [106] oddalonego o około 64 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, z wykorzystaniem kalkulatora EcoTransIT World [83]. Zakłada się wykorzystanie do tego celu w pełni załadowanego pojazdu ciężarowego w klasie ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 6. Dla zaproponowanego wariantu wartość śladu węglowego wyniesie 0,000028 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.40).

Procesy związane z przetwarzaniem kleju w gotowe produkty

Na podstawie danych literaturowych autorstwa Nora Schelte et al. “Life-cycle based evaluation of the environmental impact of chemical recycling vs. combined waste-to-energy and carbon-capture-and-utilization for selected epoxy resins”, opracowano założenia etapu związanego z procesami przetwarzania kleju w gotowe produkty [142].

W ramach opracowań przeprowadzono analizy wpływu środowiskowego (w tym wartości śladu węglowego) związanych z recyklingiem kleju. Uwzględnione procesy recyklingu chemicznego, związane są z mieleniem, denaturacją, ekstrakcją, destylacją oraz mieszaniem. Badania realizowano w skali laboratoryjnej, starając się odzwierciedlić wynik dla pełnowymiarowego obiektu przemysłowego [142,143].

Na podstawie przeprowadzonych analiz autorzy określili wartość śladu węglowego dla recyklingu kleju, nadającego się do ponownego zastosowania. Sumaryczna wartość śladu węglowego dla wszystkich procesów wynosi 1,751 kg CO₂ eq, w przeliczeniu na 1 kg kleju [142].

Dane literaturowe dotyczące wartości śladu węglowego przeliczono zgodnie z wykazaną masą kleju (0,005 kg) pochodzącego z analizowanego generatora. Łączna wartość śladu węglowego dla tego etapu wyniesie 0,0087 kg CO₂ eq.

Transport produktów handlowych do przedsiębiorstwa KOMEL

Zakłada się że produkcja kleju odbywa się, tak jak w przypadku recyklingu tworzyw sztucznych w przedsiębiorstwie „Duława Thermoplastic” (Skoczów), skąd następnie są transportowane do przedsiębiorstwa KOMEL. Dystans pomiędzy dwoma punktami wynosi 80,1 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związaną z transportem kleju. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na masę kleju z jednego generatora (0,005 kg) (obejmujący transport elementów do przedsiębiorstwa KOMEL oraz powrót do zakładu produkcyjnego) wynosi 0,00014 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.41) [85].

Podsumowanie wartości śladu węglowego recyklingu kleju

Wartość śladu węglowego wynikający z przyjętego procesu gospodarki odpadami:
+ 0,0088 kg CO₂ eq

Uzyskana redukcja wartości śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

- 0,0152 kg CO₂ eq (względem 0,024 kg CO₂ eq w przypadku wykorzystania surowców pierwotnych) - redukcja wartości śladu węglowego o 63,33%

Mieszanina elementów miedzianych i tworzywa sztucznego

Podczas demontażu generatora, polegającego na uwolnieniu uzwojenia miedzianego z rowków stojana (zaizolowanych tworzywem sztucznym), konieczne było zastosowanie urządzenia precyzyjnego z wiertłami z końcówką diamentową. W efekcie uzyskano drobną mieszaninę materiału, w skład którego wchodzi elementy miedziane oraz elementy z tworzywa sztucznego.

Proces recyklingu należy rozpocząć od rozklasyfikowania mieszaniny na dwa produkty: elementy miedziane oraz elementy z tworzyw sztucznych. Do tego wykorzystany separator elektrostatyczny, który wykorzystywany był w poprzednich badaniach (rozdział surowców zawierających pierwiastki ziem rzadkich w procesach przesiewania i separacji magnetycznej).

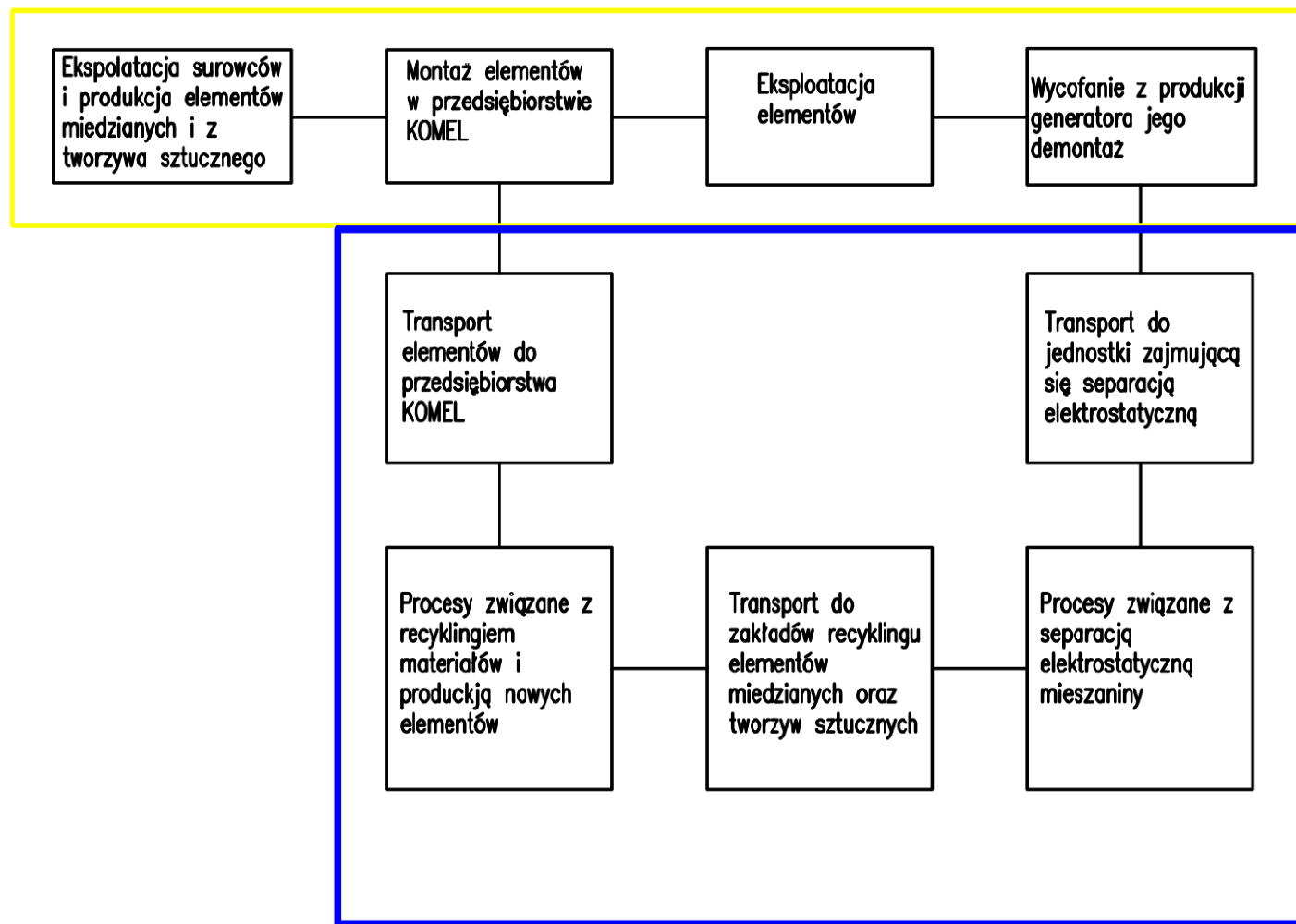
Wydzielone produkty zostaną następnie poddane procesowi recyklingu zgodnie z opracowaną metodologią dla elementów miedzianych oraz elementów z tworzyw sztucznych.

Opracowana analiza LCA zakłada obliczenie wartości śladu węglowego procesów związanych z ich recyklingiem (kolor niebieski) i wpływem na zmniejszenie wartości śladu dla procesów związanych z produkcją z surowca pierwotnego (kolor żółty) (Rys.66).

Zakres analizy obejmuje:

- transport ze stacji demontażu do jednostki zajmującej się separacją elektrostatyczną materiałów,
- procesy związane z separacją elektrostatyczną,
- transport produktów separacji do zakładów zajmujących się recyklingiem,
- procesy technologiczne oraz produkcyjne,
- transport gotowych produktów do przedsiębiorstwa KOMEL.

W założeniu recykling obejmuje 100% mieszaniny materiałów (o łącznej masie 0,18 kg), która ponownie zostanie wykorzystana.



Rys.66. Schemat LCA recyklingu mieszaniny elementów miedzianych i z tworzywa sztucznego
[opracowanie własne]

Transport ze stacji demontażu do jednostki zajmującej się separacją elektrostatyczną materiałów

Jednostka wykonująca proces separacji elektrostatycznej, tak jak stacja demontażu znajdują się w Gliwicach, a dystans pomiędzy nimi określono maksymalnie na 10 km. Dla określonego dystansu obliczono wartość śladu węglowego, związanego z transportem materiału. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu, które pozwoli na transport 1017,0 kg materiałów. Wartość śladu węglowego w przeliczeniu na masę mieszaniny z elementów miedzianych i tworzywa sztucznego z jednego generatora (0,18 kg) (obejmujący transport do jednostki przetwarzającej oraz powrót do stacji demontażu) wynosi 0,0006 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.42) [85].

Procesy związane z separacją elektrostatyczną

Na podstawie autorskich badań [144,145] proces separacji polegający na rozdzieleniu elementów miedzianych i elementów z tworzywa sztucznego, przeprowadzono z wykorzystaniem separacji elektrostatycznej. Badania realizowano separatorem „Boxmag-Rapid” (Rys.67), znajdującym się w Politechnice Śląskiej. Urządzenie to umożliwia regulację napięcia elektrody, odpowiedzialnej za generowanie ładunków elektrycznych, w zakresie od 0 do 40 kV. Zasada działania polega na umieszczeniu ziaren w polu elektrostatycznym (o ustalonym natężeniu pola elektrycznego). Na powierzchni ziaren materiału generuje się ładunek elektryczny. Częsteczki o wysokim przewodnictwie powierzchniowym szybko tracą ładunek i są usuwane z obrotowego bębna siłą odśrodkową (miedź). Pozostałe cząstki, które nie straciły swojego ładunku, są usuwane za pomocą szczotki umieszczonej na tylnej stronie bębna (tworzywo sztuczne).

Badanie polegało na dwustopniowej klasyfikacji materiału (Rys.68), w którym parametry dobrano w sposób doświadczalny (na podstawie wyników z poprzednich badań) (Tabela 21,22). Jednostopniowa separacja wykazała zanieczyszczenie frakcjami miedzianymi w frakcji tworzywa sztucznego. W separacji drugiego stopnia rozklasyfikowano ponownie frakcję zawierającą tworzywo sztuczne (zmieniając prędkość obrotową bębna), pozbywając się z niego elementów miedzianych.



Rys.67. Separator „Boxmag-Rapid
[opracowanie własne]



Rys.68. Nadawa stanowiąca mieszaninę miedzi
i tworzywa sztucznego [opracowanie własne]

Tabela 21. Dobrane parametry separatora elektrostatycznego dla separacji
I stopnia [opracowanie własne]

Lp.	Parametr	Wartość
1.	Prędkość obrotowa bębna, obr./min	60
2.	Napięcie przepływające przez elektrodę, kV	78
3.	Prędkość podawania – ustawienie podajnika wibracyjnego, 0-100%	60
4.	Uziarnienie materiału, mm	<2

Tabela 22. Dobrane parametry separatora elektrostatycznego dla separacji
II stopnia [opracowanie własne]

Lp.	Parametr	Wartość
1.	Prędkość obrotowa bębna, obr./min	80
2.	Napięcie przepływające przez elektrodę, kV	78
3.	Prędkość podawania – ustawienie podajnika wibracyjnego, 0-100%	60
4.	Uziarnienie materiału, mm	<2

Badanie pozwoliło na uzyskanie następujących wychodów poszczególnych frakcji – Tabela 23. Nie przeprowadzono dokładnych badań składu ziarnowego poszczególnych wychodów, gdyż nie jest to celem tego badania. Dostateczny stopień separacji oceniono organoleptycznie (Rys.69,70).

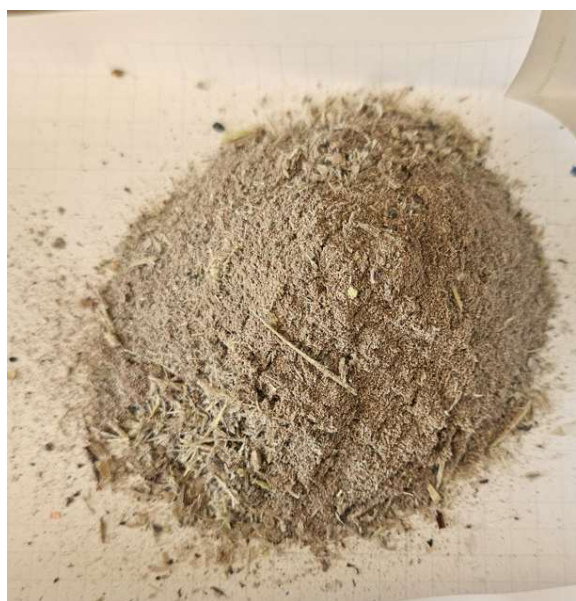
Tabela 23. Wychody masowe uzyskane z separacji elektrostatycznej [opracowanie własne]

Stopień separacji	Nadawa, [g]	Czas separacji, [min]	Produkt o większej przewodności elektrycznej (miedź), [g] / [%]	Produkt o mniejszej przewodności elektrycznej (tworzywo), [g] / [%]	Straty materiału w procesie separacji, [g] / [%]
I	180,0	13	89,2 / 49,55	90,6 / 50,33	0,2 / 0,12
II *	90,6	8	17,1 / 18,8	73,5 / 81,1	0,1 / 0,09

*separacja uzyskanego wychodu zawierającego produkt o mniejszej przewodności elektrycznej (tworzywo sztuczne)



Rys.69. Wychód miedzi
[opracowanie własne]



Rys.70. Wychód tworzywa sztucznego
[opracowanie własne]

Z przeprowadzonego badania wynika, że wychód masowy poszczególnych grup materiałowych wynosi odpowiednio: miedź-106,3 g, tworzywo sztuczne-73,5 g.

Na podstawie wychodu masowego oraz zużycia energii elektrycznej separatora, obliczono wartość śladu węglowego wynikającą z procesu separacji magnetycznej mieszaniny miedzi i tworzywa sztucznego. Obliczenia wartości śladu węglowego opierały się wyłącznie na zużyciu energii elektrycznej, gdyż pozostałe czynniki generujące ślad węglowy są marginalne. Wartość śladu węglowego związana z dojazdem pracowników do laboratorium, rozkłada się na pozostałe czynności w ciągu dnia pracy (4,3% czasu pracy).

Przeliczając średnią wartość śladu węglowego wynikającą ze zużycia energii elektrycznej w Polsce (0,652 kg CO₂ eq na 1 kWh [90]), wartość śladu węglowego związana z zastosowaniem separatora elektrostatycznego (zużycie energii elektrycznej = 0,018 kWh) wynosi 0,0117 kg CO₂ eq.

Transport produktów separacji do zakładów zajmujących się recyklingiem

Kolejne etapy związane z założeniami i obliczeniami wartości śladu węglowego przetwarzania miedzi i tworzywa sztucznego w gotowe produkty przetransportowane do przedsiębiorstwa KOMEL, bazują na danych opisanych w rozdziałach 9.2.3 (Recykling tworzyw sztucznych) oraz 9.2.4 (Recykling miedzi).

Tworzywa sztuczne transportowane są do zakładu „Duława Thermoplastic ” (Zakład w Skoczowie) oddalonego o około 64 km, natomiast miedź transportowana jest do zakładu „Metalurgia S.A. Radomsko” (Zakład w Radomsku) oddalonego o około 135 km.

Zakłada się wykorzystanie w obu przypadkach załadowanego pojazdu ciężarowego w klasie ładowności 26-40 t, spełniający normy spalin na poziomie EURO 6. Łączna wartość śladu węglowego wyniesie 0,00161 kg CO₂ eq (tworzywo sztuczne - 0,00041 kg CO₂ eq, miedź - 0,0012 kg CO₂ eq) (Załącznik 1 – Rys.43,44) [83].

Procesy technologiczne oraz produkcyjne

Obliczenia procesów produkcyjnych 1 kg danego materiału, zakładają wartość śladu węglowego na poziomie:

- Tworzywo sztuczne – 1,2 kg CO₂ eq.
- Elementy miedziane – 0,77 kg CO₂ eq.

Przeliczając uzyskane wychody masowe wartość śladu węglowego związanymi z produkcją nowych elementów wynosi 0,17 kg CO₂ eq (tworzywo sztuczne - 0,088 CO₂ eq, miedź - 0,082 CO₂ eq).

Transport gotowych produktów do przedsiębiorstwa KOMEL

Gotowe produkty transportowane są do przedsiębiorstwa KOMEL. Dla określonych dystansów obliczono wartość śladu węglowego, związanego z transportem elementów miedzianych i elementów z tworzywa sztucznego. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem kalkulatora z bazą danych CaDI, na przykładzie samochodu dostawczego Renault Trafic 2018 Euro 6, Energy Dci 125 km. W obliczeniach założono pełne wykorzystanie dostępnej ładowności pojazdu.

Wartość śladu węglowego elementów z tworzywa sztucznego (obejmujący transport elementów do przedsiębiorstwa KOMEL oraz powrót do zakładu produkcyjnego – 160,2 km) wynosi 0,02 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.45) [85].

Wartość śladu węglowego elementów miedzianych (obejmujący transport elementów do przedsiębiorstwa KOMEL oraz powrót do zakładu produkcyjnego – 244,0 km) wynosi 0,003 kg CO₂ eq (Załącznik 1 – Rys.46) [85].

Łączna wartość śladu węglowego związana z transportem elementów miedzianych oraz z tworzywa sztucznego do przedsiębiorstwa KOMEL wynosi 0,023 kg CO₂ eq.

Podsumowanie wartości śladu węglowego recyklingu mieszaniny miedzi i tworzywa sztucznego

Wartość śladu węglowego wynikająca z przyjętego procesu gospodarki odpadami:

+ 0,207 kg CO₂ eq

Uzyskana redukcja wartości śladu węglowego wynikająca z ograniczenia procesów związanych z wydobyciem surowca pierwotnego:

- 0,13 kg CO₂ eq (względem 0,337 kg CO₂ eq w przypadku wykorzystania surowców pierwotnych (elementy miedziane - 0,187 kg CO₂ eq, tworzywo sztuczne - 0,149 kg CO₂ eq) - redukcja wartości śladu węglowego o 38,57%

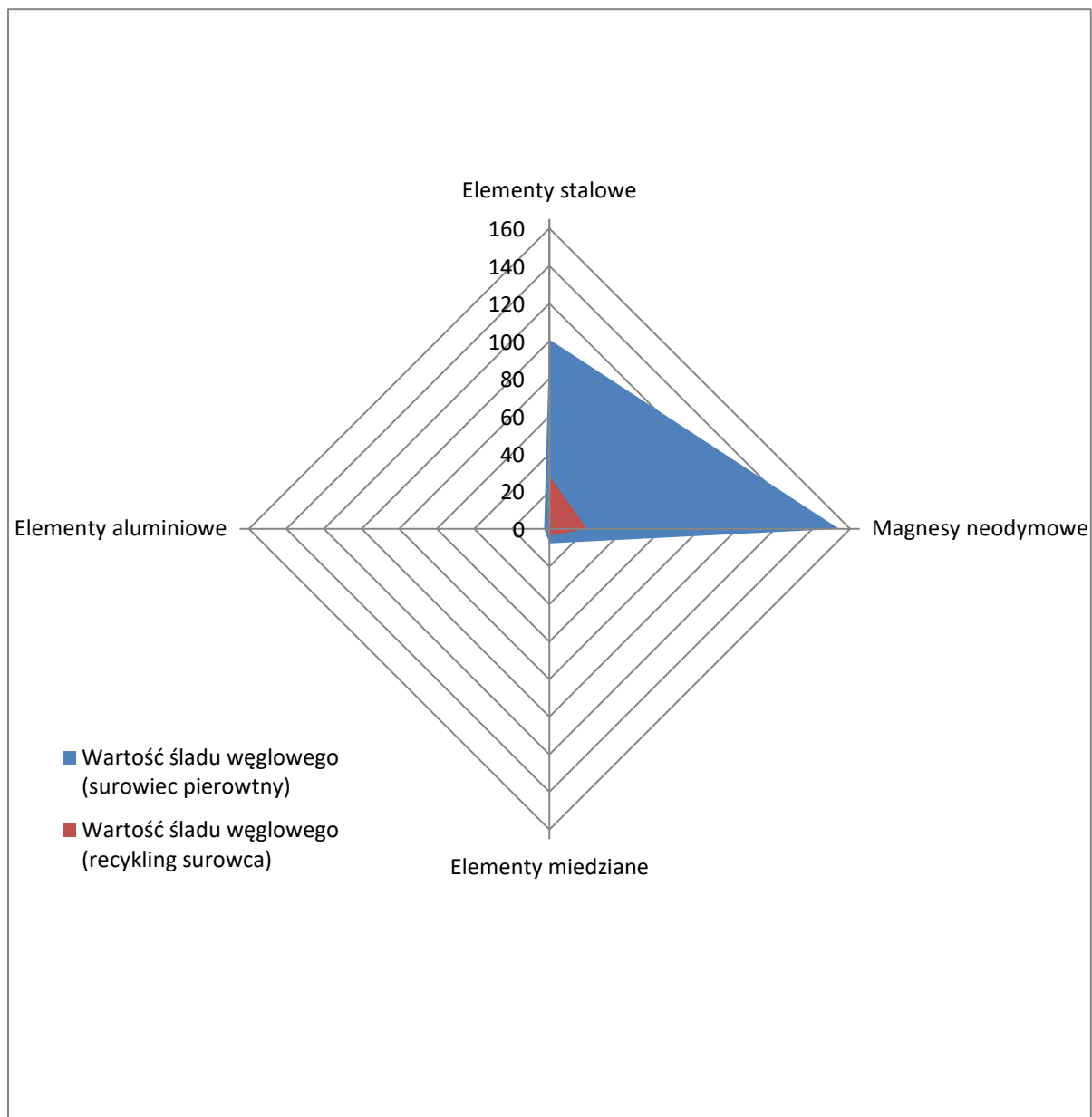
9.6. Uzyskane efekty wynikające z recyklingu generatora

Celem opracowanych scenariuszy recyklingu poszczególnych elementów generatora przydomowej turbiny wiatrowej było obliczenie wartości śladu węglowego, w porównaniu do produkcji tych elementów z surowca pierwotnego. Z przeprowadzonych obliczeń wartości śladu węglowego wynika, że recykling każdego z elementów składowych generatora ogranicza wartość śladu węglowego.

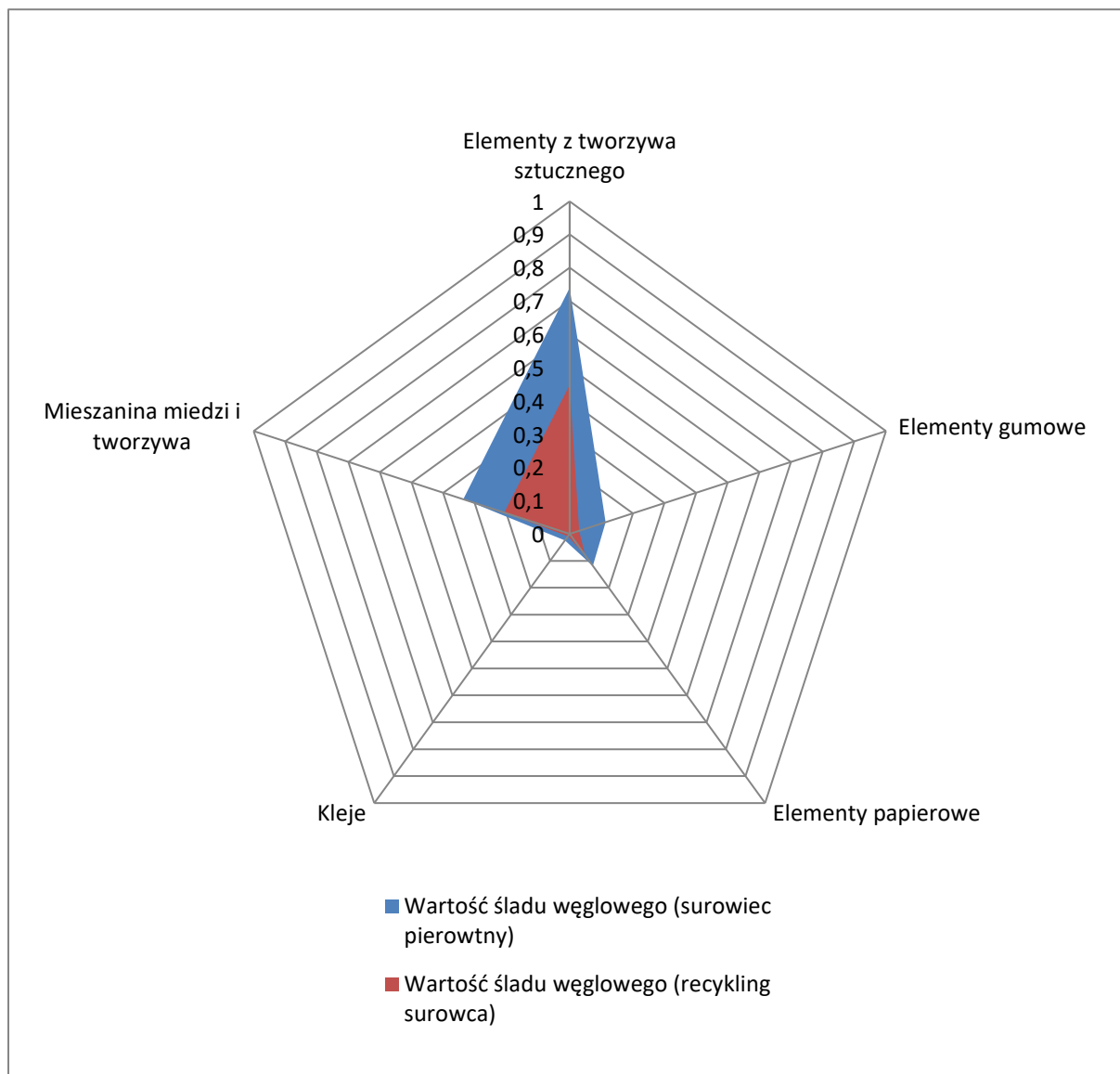
W efekcie obliczeń uzyskano następującą redukcję wartości śladu węglowego:

- Elementy stalowe – 72,73 kg CO₂ eq (redukcja wartości śladu węglowego o 72,01%).
- Elementy aluminiowe - 2,3795 kg CO₂ eq (redukcja wartości śladu węglowego o 82,91%).
- Tworzywa sztuczne - 0,292 kg CO₂ eq (redukcja wartości śladu węglowego o 39,46%).
- Elementy miedziane - 3,914 kg CO₂ eq (redukcja wartości śladu węglowego o 51,91%).
- Elementy papierowe - 0,04 kg CO₂ eq (redukcja wartości śladu węglowego o 33,61%).
- Magnesy neodymowe - 134,044 kg CO₂ eq (redukcja wartości śladu węglowego o 87,03%).
- Elementy gumowe - 0,08326 kg CO₂ eq (redukcja wartości śladu węglowego o 73,68%).
- Kleje - 0,0152 kg CO₂ eq (redukcja wartości śladu węglowego o 63,33%).
- Mieszanina elementów miedzianych i tworzywa sztucznego - 0,13 kg CO₂ eq (redukcja wartości śladu węglowego o 38,57%).

Uzyskane efekty redukcja śladu węglowego dla każdego z analizowanych elementów obrazują następujące rysunki 71 i 72.



Rys.71. Wykres porównawczy wartości śladu węglowego dla wybranych elementów generatora I
[opracowanie własne]



Rys.72. Wykres porównawczy wartości śladu węglowego dla wybranych elementów generatora II
[opracowanie własne]

Łączna wartość uzyskanej redukcji wartości śladu węglowego dla pełnego cyklu życia generatora wynosi 213,29 kg CO₂ eq. Porównując uzyskany wynik do wartości śladu węglowego związanej z produkcją elementów z surowca pierwotnego (496,08 kg CO₂ eq), uzyskano redukcję o 43,06 %.

9.7. Przełożenie obliczeń wpływu środowiskowego przydomowego generatora turbiny wiatrowej na skalę przemysłową

Realizowana praca ma charakter wdrożeniowy, co umożliwia przełożenie jej wyników na inne urządzenia tego typu oraz ich ekstrapolację do skali przemysłowej w celu oszacowania wpływu środowiskowego na poziomie jednostkowym i całej farmy wiatrowej. Z uwagi na rosnące znaczenie energetyki wiatrowej w krajowej strukturze wytwarzania energii, istotne jest

określenie potencjalnych korzyści wynikających z zastosowania strategii ograniczania śladu węglowego, poprzez wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu.

W związku z powyższym przeprowadzono analizę możliwości przełożenia wyników uzyskanych dla przydomowego generatora turbiny wiatrowej na skalę przemysłową – zarówno dla pojedynczej turbiny wiatrowej, jak i dla całej farmy wiatrowej typowej dla warunków polskich. Podstawą obliczeń było założenie liniowej zależności pomiędzy masą urządzenia a jego śladem węglowym, wyrażonej wzorem:

$$E_{ind} = \alpha * m_{ind}$$

$$\alpha = \frac{E_{dom}}{m_{dom}}$$

oraz dla farmy:

$$E_{farma} = n * E_{ind}$$

gdzie E oznacza ślad węglowy generatora [$kg CO_{2e}$], m – masę generatora [kg], α – intensywność emisyjną względem masy [$kg CO_{2e}/kg$], a n – liczbę turbin w farmie.

Na podstawie dostępnych danych przyjęto, że przeciętna lądowa turbina wiatrowa wykorzystywana w Polsce, wyposażona w generator z magnesami neodymowymi, osiąga moc około 2,3 MW, natomiast największe farmy wiatrowe w kraju mają moc powyżej 240 MW (farma wiatrowa Banie o mocy 243 MW) [18,146]. Masa generatora wykorzystywanego w przemysłowej turbinie wiatrowej została określona na około 220 000 kg (220 ton) [147].

Przyjmując masę analizowanego generatora przydomowej turbiny wiatrowej na poziomie 69,95 kg, obliczono stosunek masy przemysłowego generatora do jednostkowego generatora, który wynosi 3145. W dalszej kolejności proporcjonalnie przeskalowano obliczony wcześniej wpływ środowiskowy (ślad węglowy) przydomowego generatora, który wynosi 496,08 kg CO_2 eq w całym cyklu życia urządzenia, zakładając wykorzystanie materiałów pochodzących z surowców pierwotnych.

W związku z czym, o krotność tej wartości pomnożono wartość śladu węglowego dla generatora przydomowego, uzyskując proporcjonalną wartość śladu węglowego generatora przemysłowego:

$$E_{ind} = 496,08 * 3145 = 1\,560\,171,6 \, kgCO_{2e}$$

Analogicznie, dla farmy wiatrowej o mocy 243 MW, składającej się ze 106 turbin wiatrowych (każda o mocy 2,3 MW), wartość całkowitego śladu węglowego związanego z produkcją generatorów wynosi:

$$E_{farma} = 106 * 1\,560\,171,6 = 165\,378\,189,6 \, kgCO_{2e}$$

Następnie oszacowano potencjalną redukcję emisji wynikającą z zastosowania elementów pochodzących z recyklingu. Przy założeniu redukcji emisji o $r = 43,06\%$, uzyskano znaczne obniżenie wartości śladu węglowego:

$$E_{ind}^r = (1 - r) * E_{ind} = 888\,584,4 \text{ kgCO}_{2e}$$

$$E_{farma}^r = (1 - r) * E_{farma} = 94\,212\,328,8 \text{ kgCO}_{2e}$$

Powyższa świadomie uproszczona analiza ukazuje skalę oddziaływania produkcji generatorów turbin wiatrowych na środowisko naturalne. Jednocześnie wskazuje na potencjalnie wysokie redukcje wartości gazów cieplarnianych, które są możliwe do uzyskania dzięki zastosowaniu komponentów pochodzących z recyklingu.

Uwaga metodologiczna

Ekstrapolacja do skali przemysłowej opiera się na liniowym skalowaniu proporcjonalności śladu węglowego do masy. Założenie to upraszcza rzeczywistość: w pełnej analizie LCA mogą ujawniać się efekty skali, różnice w składzie materiałowym i technologiach wytwarzania, odmienne profile transportowe oraz zmienna energochłonność procesów. Wyniki należy więc traktować jako oszacowania rzędu wielkości, a nie dokładne wartości inwentaryzacyjne.

IV. Wnioski

Polskie farmy wiatrowe są stosunkowo młode, co sprawia, że krajowa gospodarka w przeciwieństwie do bardziej rozwiniętych rynków energetyki wiatrowej dopiero zaczyna mierzyć się z problemem recyklingu wyeksploatowanych turbin. Przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej analizy miały na celu wskazanie właściwych sposobów zagospodarowania odpadów powstałych w przemyśle energetycznym, zgodnych z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym.

Badania przeprowadzono na generatorze PMzg132-8B, typowo stosowanym w coraz popularniejszych przydomowych turbinach wiatrowych. Na podstawie analizy literatury oraz współpracy z przedsiębiorstwem KOMEL (od której pozyskano urządzenie), opracowano kompleksową metodologię wyznaczania wartości śladu węglowego dla pełnego cyklu życia generatora. Proces ten uwzględniał etapy pozyskania surowców, produkcji, transportu, eksploatacji oraz końca życia produktu, zgodnie z zasadą „od kołyski aż po grób”. Ocenie poddano wpływ poszczególnych etapów na środowisko, a także wskazano możliwości ich ograniczenia.

Na podstawie szczegółowej analizy materiałowej oraz opracowanej metodzie demontażu określono zarówno strukturę, jak i ilościowy skład komponentów generatora. Wyróżniono dziewięć grup materiałowych: elementy stalowe, aluminiowe, miedziane, gumowe, papierowe, tworzywa sztuczne, magnesy neodymowe, kleje oraz mieszaniny materiałowe powstałe podczas demontażu. Dla niektórych materiałów, których struktura nie była jednoznaczna, przeprowadzono dodatkowe badania z wykorzystaniem spektroskopii FTIR, które pozwoliły zidentyfikować m.in. tworzywa polipropylenowe oraz komponenty gumowe.

Analizowany generator zawiera szereg surowców krytycznych oraz strategicznych, w tym pierwiastki ziem rzadkich wykorzystywane do produkcji magnesów NdFeB. Przeprowadzona analiza składu magnesów wykazała niemal 30-procentowy udział pierwiastków ziem rzadkich (REE). Przeprowadzono również analizę magnesów polegającą na ocenie ryzyka utraty dostaw surowców strategicznych, wskaźnika recyklingu i ich zastępowalności. Ryzyko utraty dostaw takich surowców jak kobalt, gal, prazeodym, neodym i dysproz oceniono jako bardzo wysokie (na poziomie 9,5). Wskaźnik recyklingu dla galu, prazeodymu, neodymu i dysprozu pozostaje na bardzo niskim poziomie – poniżej 10%, a ich zastępowalność jest ograniczona. Łącznie, materiały zawierające surowce krytyczne stanowią 9,84% masy całego generatora – są to przede wszystkim magnesy NdFeB, elementy aluminiowe oraz miedziane uzwojenia stojana i przewody.

W dalszej części badań przeprowadzono szczegółowe obliczenia wartości śladu węglowego cyklu życia generatora. Pochodzenie poszczególnych danych pozwalających na obliczenie wartości śladu węglowego pochodziło z bazy danych Ecoinvent 3.3 oraz GaBi, które zostały przeliczone z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro, danych literaturowych związanych z magnesami neodymowymi oraz na podstawie różnych źródeł literaturowych oraz informacji pozyskanych z przedsiębiorstwa KOMEL.

Na podstawie przeprowadzonych analiz materiałowych oraz obliczeń z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro, uzyskano następujące wartości śladowego związanej z wyprodukowaniem i dostarczeniem do przedsiębiorstwa KOMEL, poszczególnych składowych generatora: elementy stalowe – 101,0 kg CO₂ eq, aluminiowe – 2,87 kg CO₂ eq, miedziane – 7,54 kg CO₂ eq, gumowe – 0,113 kg CO₂ eq, papierowe – 0,119 kg CO₂ eq, tworzywa sztuczne – 0,74 kg CO₂ eq, kleje – 0,024 kg CO₂ eq.

Z kolei dla magnesów neodymowych obliczona na podstawie przeprowadzonych analiz materiałowych, danych literaturowych oraz dostępnych baz danych, wartość śladu węglowego wynosi 154,024 kg CO₂ eq.

Kolejne obliczenia dotyczyły procesów związanych z dalszym cyklem życia urządzenia: montaż generatora w KOMEL (33,14 kg CO₂ eq), transport do miejsca instalacji turbiny (17,53 kg CO₂ eq), montaż i serwis w turbinie (140,659 kg CO₂ eq), transport do miejsca demontażu (17,53 kg CO₂ eq) oraz demontaż generatora (20,7884 kg CO₂ eq). Łączna wartość śladu węglowego związana z produkcją i dostarczeniem komponentów do KOMEL wyniosła 266,43 kg CO₂ eq, natomiast suma pozostałych etapów wynosi 229,65 kg CO₂ eq. W rezultacie, całkowity ślad węglowy obejmujący produkcję, użytkowanie i demontaż generatora wyniósł 496,08 kg CO₂ eq.

W ramach analizy wrażliwości zbadano wpływ różnych scenariuszy transportu magnesów neodymowych na całkowity ślad węglowy. Uwzględniono transport drogowy (samochód dostawczy i ciężarowy), kolejowy, rzeczny (barka) oraz lotniczy. Najniższy poziom emisji zanotowano w przypadku transportu pociągiem towarowym (0,034 kg CO₂ eq), nieco wyższy dla ciężarówki (0,072 kg CO₂ eq) i barki (0,178 kg CO₂ eq). Z kolei najwyższy poziom emisji wiązał się z transportem samolotem (4,69 kg CO₂ eq) oraz samochodem dostawczym, przewożącym wyłącznie magnesy (85,9 kg CO₂ eq). W ten sposób wykazano, że sposób transportu może mieć istotny wpływ na całkowity ślad węglowy produktu. Jest to jeden z kluczowych czynników (pomijając recykling) umożliwiających jego redukcję.

Zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym, przeanalizowano także różne scenariusze recyklingu poszczególnych grup materiałowych wchodzących w skład generatora. Wyniki zestawiono z wartością śladu węglowego produkcji materiałów z surowców pierwotnych, co pozwoliło oszacować potencjalne redukcje emisji.

Dla mieszaniny miedzi i tworzywa sztucznego opracowano autorską metodologię recyklingu opartą na separacji elektrostatycznej. Pozwoliła ona na uzyskanie czystych frakcji materiałowych i oszacowanie wpływu środowiskowego recyklingu.

We wszystkich przypadkach recykling przyczyniał się do istotnej redukcji śladu węglowego. Uzyskane wartości redukcji wyniosły odpowiednio: dla elementów stalowych – 72,01%, aluminiowych – 82,91%, miedzianych – 51,91%, gumowych – 73,68%, papierowych – 33,61%, tworzyw sztucznych – 39,46%, klejów – 63,33%, magnesów neodymowych – aż 87,03%, a dla mieszaniny miedzi i tworzyw – 38,57%.

Łączna wartość uzyskanej redukcji wartości śladu węglowego dla pełnego cyklu życia generatora wynosi 213,29 kg CO₂ eq (redukcja o 43,06 %).

Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają konieczność wdrażania rozwiązań zgodnych z gospodarką o obiegu zamkniętym w sektorze odnawialnych źródeł energii. Szczególne znaczenie ma projektowanie i produkcja generatorów z uwzględnieniem obecności surowców krytycznych, takich jak magnesy neodymowe. Ograniczając ślad węglowy nie tylko redukujemy emisje gazów cieplarnianych, ale również zmniejszamy zużycie surowców naturalnych i uniezależniamy się od niestabilnych łańcuchów dostaw. Praca ta stanowi przykład, jak zintegrowane podejście – łączące analizę środowiskową z praktykami recyklingowymi – może wspierać transformację energetyczną w sposób zrównoważony i efektywny.

Na podstawie przeprowadzonych prac, sformułowano odpowiedzi na postawione pytania problemowe oraz odpowiedziano na zadaną tezę pracy:

- **Czy zastosowanie technologii recyklingu generatora turbiny wiatrowej z magnesami trwałymi znacząco obniży ślad węglowy?**

Tak, recykling generatora znacząco obniża ślad węglowy w porównaniu z produkcją generatorów opartych na surowcach pierwotnych. Magnesy NdFeB stanowią kluczowy element, którego produkcja z surowców pierwotnych generuje znaczne emisje – 154,024 kg CO₂ eq, dlatego ich recykling przynosi największe korzyści, redukując emisję aż o 87,03%. Jednak inne komponenty, takie jak elementy stalowe (101,0 kg CO₂ eq, redukcja 72,01%), aluminiowe (2,87 kg CO₂ eq, redukcja 82,91%), miedziane (7,54 kg CO₂ eq, redukcja 51,91%) czy tworzywa sztuczne (0,74 kg CO₂ eq, redukcja 39,46%) również mogą zostać poddane recyklingowi, co dodatkowo zmniejsza ślad węglowy całego generatora. Dodatkowo, w przypadku elementów gumowych (0,113 kg CO₂ eq, redukcja 73,68%), papierowych (0,119 kg CO₂ eq, redukcja 33,61%) oraz klejów (0,024 kg CO₂ eq, redukcja 63,33%), recykling również przyczynia się do redukcji emisji.

Recykling materiałów wchodzących w skład generatora pozwala na uniknięcie emisji związanych z wydobyciem i przetwarzaniem nowych surowców, co ma pozytywny wpływ na ogólną wartość śladu węglowego generatora, która dla pełnego cyklu życia wynosi 496,08 kg CO₂ eq. Dzięki zastosowaniu recyklingu uzyskano redukcję o 213,29 kg CO₂ eq, co odpowiada 43,06% całkowitego śladu węglowego.

- **Czy zastosowanie technologii recyklingu powoduje dodatkową emisję gazów cieplarnianych?**

Proces recyklingu generuje pewne dodatkowe emisje gazów cieplarnianych, głównie wynikające z transportu materiałów do miejsc przetwarzania oraz samego procesu przetwarzania, np. zużycia energii podczas demontażu czy odtwarzania funkcjonalności materiałów. Jednak emisje te są znacznie mniejsze w porównaniu do emisji związanych z pozyskaniem surowców pierwotnych – stanowią one jedynie około 19,94% wartości śladu węglowego elementów wytwarzanych z surowców pierwotnych (53,14 kg CO₂ eq wobec 266,43 kg CO₂ eq).

Rozpatrując cały cykl życia generatora, wyeliminowanie fazy wydobycia rzadkich pierwiastków ziemi, takich jak neodym czy dysproz, oraz zmniejszenie ilości energii potrzebnej

do wytworzenia nowych produktów znacząco redukuje całkowity ślad węglowy (redukcja o 213,29 kg CO₂ eq/ 43,06%). Produkcja z surowców pierwotnych, szczególnie w sektorze metalurgicznym, obejmuje wieloetapowe procesy, które są bardzo energochłonne i emitują znaczne ilości CO₂ oraz innych zanieczyszczeń. Recykling pozwala na odzysk materiałów już wcześniej przetworzonych, co ogranicza emisje na każdym etapie cyklu życia produktu.

Zastosowanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) w procesie recyklingu generuje mniej odpadów, co dodatkowo obniża emisje związane z utylizacją i składowaniem odpadów. Recykling wymaga wykorzystania energii, ale jej zużycie jest znacznie mniejsze niż w przypadku wydobywania i przetwarzania surowców pierwotnych. Prowadzi to do ogólnej redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz mniejszego obciążenia środowiska.

- **Czy opracowaną metodykę można zastosować do innych typów generatorów?**

Metodyka wyznaczania wartości śladu węglowego opisana w pracy jest na tyle elastyczna, że może być zastosowana do innych typów generatorów. Konieczne jest uwzględnienie różnic w ich składzie materiałowym, specyfice procesów produkcyjnych transportem i recyklingiem.

Dzięki zastosowaniu odpowiednich norm i standardów oceny cyklu życia (LCA), takich jak ISO 14040 i 14044, metodyka ta może być z powodzeniem adaptowana do szerokiej gamy generatorów, zapewniając dokładne wyznaczenie wartości śladu węglowego dla różnych konfiguracji materiałowych i technologicznych.

Metodyka może być zastosowana do innych urządzeń przemysłowych. Inne urządzenia przemysłowe również korzystają z szerokiej gamy surowców, w tym stali, miedzi, aluminium czy tworzyw sztucznych, które wymagają uwzględnienia w analizie śladu węglowego.

Teza: Zastosowanie recyklingu magnesów neodymowych oraz zasad gospodarki obiegu zamkniętego w produkcji generatorów do turbiny wiatrowej, zmniejszy emisję śladu węglowego w stosunku do produkcji generatorów wykorzystujących surowce pierwotne. Zastosowanie procesu recyklingu wiąże się z nowym źródłem emisji śladu węglowego, które musi zostać uwzględnione w aspekcie wyznaczania śladu węglowego produkcji generatora.

Teza pracy, która zakłada, że zastosowanie recyklingu magnesów neodymowych oraz zasad gospodarki obiegu zamkniętego przyczyni się do obniżenia śladu węglowego produkcji generatorów, została potwierdzona. Zastosowanie procesów recyklingu nie tylko zmniejsza emisje, ale również redukuje zależność od surowców pierwotnych, w tym krytycznych surowców takich jak neodym i dysproz, co ma strategiczne znaczenie dla zrównoważonego rozwoju.

Proces recyklingu generuje pewne dodatkowe emisje, jednak są one znacznie mniejsze niż emisje związane z produkcją z surowców pierwotnych. Emisje związane z transportem i przetwarzaniem materiałów pochodzących z recyklingu są niższe niż te, które wynikają z wydobywania i wstępnej obróbki surowców.

Podsumowując, praca doktorska pt. „Analiza śladu węglowego produkcji magnesów neodymowych do generatorów turbin wiatrowych z uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego” skupia się na ocenie wpływu zastosowania technologii recyklingu i zasad gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) w kontekście redukcji śladu węglowego podczas wyznaczonego cyklu życia generatorów do turbin wiatrowych.

Przeprowadzona analiza potwierdziła, że recykling komponentów generatora, znacząco zmniejsza emisję gazów cieplarnianych w porównaniu do produkcji opartej na surowcach pierwotnych. Możliwe jest zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko, a także ograniczenie zależności od krytycznych surowców, których dostępność jest zagrożona. Kluczowe znaczenie ma możliwość ograniczenia emisji związanych z wydobyciem i transportem surowców, co w tradycyjnym modelu produkcyjnym stanowiło istotny element generujący wysoką wartość śladu węglowego.

Metodyka pracy obejmowała analizę cyklu życia generatora (LCA) w oparciu o standardy międzynarodowe oraz zastosowanie dedykowanych baz danych, programu SimaPro oraz danych z analiz literaturowych, pozwoliło na dokładne wyznaczenie wartości śladu węglowego dla komponentów pochodzących z recyklingu, jak i z pierwotnych surowców. Przeprowadzone badania wykazały również, że opracowana metodyka może być stosowana do innych typów generatorów.

Podkreślono także znaczenie gospodarki o obiegu zamkniętym, której zasady mogą zostać wprowadzone na każdym etapie cyklu życia produktu – od wydobycia surowców, przez produkcję, użytkowanie, aż po demontaż i ponowne wykorzystanie materiałów. Zastosowanie tego podejścia przynosi korzyści ekologiczne i ekonomiczne, promując zrównoważony rozwój w sektorze energetycznym.

Ostatecznie, praca podkreśla znaczenie recyklingu i GOZ jako kluczowych narzędzi w dążeniu do minimalizacji śladu węglowego, co jest istotnym elementem transformacji energetycznej w kierunku bardziej zrównoważonych technologii.

Literatura:

1. https://www.forum-energii.eu/2024_wrapped (dostęp: 30.07.2025).
2. <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/recykling-lopatty-turbin-wiatrowych-raport-8792.html> (dostęp: 30.07.2025).
3. Deeney, P.; Leahy, P.G.; Campbell, K.; Ducourtieux, C.; Mullally, G.; Dunphy, N.P. End-of-Life Wind Turbine Blades and Paths to a Circular Economy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2025, 212, 115418, doi:10.1016/j.rser.2025.115418.
4. Garbala, K.; Tokajuk, M.; Kałaur, K.; Cybulko Klasyfikacja i Charakterystyka Turbin Wiatrowych : (Silników Wiatrowych). *Apar. Badaw. Dydakt.* 2020, T. 25, 56–60.
5. Uracz, P.; Karolewski, B. Modelowanie turbin wiatrowych z wykorzystaniem charakterystyk współczynnika mocy. *Pr. Nauk. Inst. Masz. Napędów Pomiarów Elektr. Politech. Wroc. Stud. Mater.* 2006, Vol. 59, 226–233.
6. Leithead, W.E. Wind Energy. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 2007, 365, 957–970, doi:10.1098/rsta.2006.1955.
7. Konieczko, A. Historia Energetyki Wiatrowej w Polsce. *Inżynieria* 2012, 48–49.
8. Rola energetyki wiatrowej w rozwoju rynków energii w Polsce, Europie i na świecie. In *Międzynarodowa konferencja naukowa “Współczesne wyzwania rozwoju gospodarczego. Polityka i kreacja potencjału”*, 22-24 maja 2014; Zawada, M., Ed.; Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku: Białystok, 2015; pp. 23–37 ISBN 978-83-7431-476-3.
9. <https://windenergy-tpa.pl/> (dostęp: 13.03.2025).
10. Systemowe Aspekty Rozwoju OZE. In *Kierunki i perspektywy rozwoju odnawialnych źródeł energii: wybrane aspekty: monografia*; Bordun, I., Sowiński, J., Kornatka, M., Gawlak, A., Panowski, M., Kacprzak, A., Ivašišin, F.O., Kogut, Z.O., Wichliński, M., Rajczyk, R., Eds.; Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej: Częstochowa, 2022; pp. 136–159 ISBN 978-83-7193-875-7.
11. <https://www.money.pl/gospodarka/energia-z-wiatru-jest-najtansza-ekspertka-podaje-wyliczenia-ta-roznica-jest-ogromna-6856496797309057v.html> (dostęp: 13.03.2025).
12. *Ustawa z Dnia 20 Maja 2016 r. o Inwestycjach w Zakresie Elektrowni Wiatrowych*;
13. *Ustawa z Dnia 9 Marca 2023 r. o Zmianie Ustawy o Inwestycjach w Zakresie Elektrowni Wiatrowych Oraz Niektórych Innych Ustaw*;
14. <https://globenergia.pl/zegnamy-10h-ustawa-wiatrakowa-oficjalnie-przyjeta-przez-rzad/> (dostęp: 28.03.2025).
15. <https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-kse/raporty-roczne-z-funkcjonowania-kse-za-rok/raporty-za-rok-2022> (dostęp: 13.03.2025).
16. <https://globenergia.pl/rekordowy-wrzesien-dla-polskiego-oze-blisko-37-energii-pochodzilo-z-odnawialnych-zrodel/> (dostęp: 28.03.2025).
17. <https://balticpower.pl/o-projekcie/> (dostęp: 13.03.2025).
18. Kwinta, W. Wiatrowe Farmy Morskie i Lądowe. Jaka Czeka Je Przyszłość? *Inżynieria* 86, 18–29.
19. <https://www.energetyka.plus/rodzaje-turbin-wiatrowych/> (dostęp: 13.03.2025).
20. Englberger, A.; Lundquist, J.K.; Dörnbrack, A. Changing the Rotational Direction of a Wind Turbine under Veering Inflow: A Parameter Study. *Wind Energy Sci.* 2020, 5, 1623–1644, doi:10.5194/wes-5-1623-2020.
21. Lamas Galdo, M.I.; Cartelle Barros, J.J.; Orosa García, J.A.; Rodríguez García, J.D.; Couce Casanova, A. Introduction to Wind Turbines. In *Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment*; Elsevier, 2024; pp. 331–342 ISBN 978-0-323-93941-6.
22. <https://instsani.pl/technik-urzadzen-i-systemow-energetyki-odnawialnej/vademecum-energetyki-odnawialnej/energia-wiatru/silownie-wiatrowe/zasada-dzialania-silowni-wiatrowej/> (dostęp: 13.03.2025).

23. Yassine, B.I.; Boumediene, A. Renewable Energies Evaluation and Linking to Smart Grid. *Int. J. Power Electron. Drive Syst. IJPEDS* 2020, *11*, 107, doi:10.11591/ijpeds.v11.i1.pp107-118.
24. Onar, O.C.; Khaligh, A. Energy Sources. In *Alternative Energy in Power Electronics*; Elsevier, 2015; pp. 81–154 ISBN 978-0-12-416714-8.
25. Toirov, O.; Taniev, M.; Hamdamov, M.; Sotiboldiev, A. Power Losses of Asynchronous Generators Based on Renewable Energy Sources. *E3S Web Conf.* 2023, *434*, 01020, doi:10.1051/e3sconf/202343401020.
26. Gryz, K.; Karpowicz, J. Ekspozycja Na Pola Elektromagnetyczne w Elektrowniach Wiatrowych. *Occup. Saf. – Sci. Pract.* 2016, *538*, 10–13, doi:10.5604/01377043.1210089.
27. Brown, D.; Ma, B.-M.; Chen, Z. Developments in the Processing and Properties of NdFeB-Type Permanent Magnets. *J. Magn. Magn. Mater.* 2002, *248*, 432–440, doi:10.1016/S0304-8853(02)00334-7.
28. Baron, R.; Matusiak, P.; Lutyński, A.; Lutyński, M. *Przegląd literatury pod kątem przyszłego programu badań dotyczącego analizy śladu węglowego produkcji magnesów neodymowych*; KOMAG Institute of Mining Technology, Poland: PL, 2022;
29. Shammugam, S.; Gervais, E.; Schlegl, T.; Rathgeber, A. Raw Metal Needs and Supply Risks for the Development of Wind Energy in Germany until 2050. *J. Clean. Prod.* 2019, *221*, 738–752, doi:10.1016/j.jclepro.2019.02.223.
30. Mishnaevsky, L.; Branner, K.; Petersen, H.; Beauson, J.; McGugan, M.; Sørensen, B. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials* 2017, *10*, 1285, doi:10.3390/ma10111285.
31. <https://strefainwestorow.pl/artykuly/oze/20210526/turbina-wiatrowa-panel-sloneczny> (dostęp: 13.03.2025).
32. Cranfield University, UK; Borg, M.; Collu, M.; Cranfield University, UK; Brennan, F.P.; Cranfield University, UK Offshore Floating Vertical Axis Wind Turbines: Advantages, Disadvantages and Dynamics Modeling State of the Art. In *Proceedings of the Marine & Offshore Renewable Energy 2012*; RINA, September 26 2012; pp. 33–46.
33. Ferguson, A.R.B. Wind Power: Benefits and Limitations. In *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems*; Pimentel, D., Ed.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2008; pp. 133–151 ISBN 978-1-4020-8653-3.
34. Hektus, P. Czynniki Lokalizacji Elektrowni Wiatrowych w Polsce. Rozprawa doktorska, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza: Poznań, 2020.
35. Kalda, G. Wykorzystanie w Polsce energii wiatru do oświetlania i ogrzewania. *Zesz. Nauk. Politech. Rzesz. Bud. Inż. Śr.* 2012, *z. 59, nr 4*.
36. <https://www.gramwzielone.pl/energia-wiatrowa/20143196/beda-ulatwienia-dla-mikroinstalacji-wiatrowych-i-systemow-off-grid> (dostęp: 13.03.2025).
37. European Commission. Joint Research Centre. *The Role of Rare Earth Elements in Wind Energy and Electric Mobility: An Analysis of Future Supply/Demand Balances.*; Publications Office: LU, 2020;
38. Jensen, J.P. Evaluating the Environmental Impacts of Recycling Wind Turbines. *Wind Energy* 2019, *22*, 316–326, doi:10.1002/we.2287.
39. <https://www.cire.pl/artykuly/brak-kategorii/pelny-recykling-lopatek-turbin-wiatrowych---przyszlosc-czy-zludna-nadzieja> (dostęp: 13.03.2025).
40. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/accelerating-wind-turbine-blade-circularity/> (dostęp: 13.03.2025).
41. Beauson, J.; Laurent, A.; Rudolph, D.P.; Pagh Jensen, J. The Complex End-of-Life of Wind Turbine Blades: A Review of the European Context. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022, *155*, 111847, doi:10.1016/j.rser.2021.111847.

42. <https://www.emerson.com/en-us/automation/control-and-safety-systems/distributed-control-systems-dcs/ovation-distributed-control-system/wind-turbine-controls/wind-turbine-scada-system> (dostęp: 13.03.2025).
43. <https://www.pgi.gov.pl/aktualnosci/display/14403-surowce-krytyczne-w-nowym-rozporzadzeniu-i-wykazie-komisji-europejskiej.html> (dostęp: 13.03.2025).
44. Jin, H.; Afiuny, P.; McIntyre, T.; Yih, Y.; Sutherland, J.W. Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling. *Procedia CIRP* 2016, 48, 45–50, doi:10.1016/j.procir.2016.03.013.
45. Bailey, G.; Orefice, M.; Sprecher, B.; Önal, M.A.R.; Herraiz, E.; Dewulf, W.; Van Acker, K. Life Cycle Inventory of Samarium-Cobalt Permanent Magnets, Compared to Neodymium-Iron-Boron as Used in Electric Vehicles. *J. Clean. Prod.* 2021, 286, 125294, doi:10.1016/j.jclepro.2020.125294.
46. *Elektrownie wiatrowe w środowisku człowieka*; Komitet Ochrony Środowiska PAN: Lublin, 2022; ISBN 978-83-63714-77-2.
47. Sala, D.; Bieda, B. Zarządzanie Pierwiastkami Ziemi Rzadkich (REE) w Gospodarce Światowej: Studium Przypadku Neodymion. *Inż. Miner.* 2024, 2, doi:10.29227/IM-2023-02-53.
48. Baron, R. Determination of Rare Earth Elements Content in Hard Coal Type 31.1. *Manag. Syst. Prod. Eng.* 2020, 28, 240–246, doi:10.2478/mspe-2020-0034.
49. Balaram, V. Rare Earth Elements: A Review of Applications, Occurrence, Exploration, Analysis, Recycling, and Environmental Impact. *Geosci. Front.* 2019, 10, 1285–1303, doi:10.1016/j.gsf.2018.12.005.
50. Lisowski, R. Struktura i Właściwości Magnesów Alnico Wytwarzanych Metodami Metalurgii Proszków. Praca dyplomowa, Politechnika Warszawska: Warszawa, 2010.
51. <https://www.energy.gov/policy/securing-americas-clean-energy-supply-chain> (dostęp: 13.03.2025).
52. <https://Ree4eu.eu/Overall-Results/> (dostęp: 13.03.2025).
53. Sprecher, B.; Xiao, Y.; Walton, A.; Speight, J.; Harris, R.; Kleijn, R.; Visser, G.; Kramer, G.J. Life Cycle Inventory of the Production of Rare Earths and the Subsequent Production of NdFeB Rare Earth Permanent Magnets. *Environ. Sci. Technol.* 2014, 48, 3951–3958, doi:10.1021/es404596q.
54. Recykling surowców krytycznych na przykładzie neodymu. In *Współczesne problemy ochrony środowiska i energetyki 2018: praca zbiorowa*; Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów. Politechnika Śląska: Gliwice, 2019; pp. 227–239 ISBN 978-83-950087-2-6.
55. Adrwish, S.M.A. The Processing and Characterisation of Recycled NdFeB Based Magnets. d_ph, University of Birmingham, 2013.
56. <http://pl.greatmagtech.com/info/the-environmental-impact-of-neodymium-magnets-82101878.html> (dostęp: 14.03.2025).
57. Diehl, O.; Schönfeldt, M.; Brouwer, E.; Dirks, A.; Rachut, K.; Gassmann, J.; Güth, K.; Buckow, A.; Gauß, R.; Stauber, R.; et al. Towards an Alloy Recycling of Nd–Fe–B Permanent Magnets in a Circular Economy. *J. Sustain. Metall.* 2018, 4, 163–175, doi:10.1007/s40831-018-0171-7.
58. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-9-2023-000346_EN.html (dostęp: 14.03.2025).
59. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits> (dostęp: 14.03.2025).
60. <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/european-green-deal/> (dostęp: 14.03.2025).
61. <https://studio.pwc.pl/aktualnosci/dotacje/regulacje-prawne-i-wytyczne-w-obszarze-gospodarki-o-obiegu-zamknietych-goz> (dostęp: 14.03.2025).

62. Kulczycka, J.; Wernicka, M. Metody i wyniki obliczania śladu węglowego działalności wybranych podmiotów branży energetycznej i wydobywczej. *Zesz. Nauk. Inst. Gospod. Surowcami Miner. Energią PAN* 2015, nr 89.
63. <https://exergy.pl/oferta/slady-weglowe-organizacji-i-produktu/> (dostęp: 14.03.2025).
64. Zarczuk, J.; Klepacki, B. Pojęcie, Znaczenie i Pomiar Śladu Węglowego (Carbon Footprint). *Ekon. Organ. Logistyki* 2021, 6, 85–95, doi:10.22630/EIOL.2021.6.1.8.
65. *The Guide to PAS 2050:2011: How to Carbon Footprint Your Products, Identify Hotspots and Reduce Emissions in Your Supply Chain*; BSI: London, 2011; ISBN 978-0-580-77432-4.
66. <https://pre-sustainability.com/articles/product-carbon-footprint-standards-which-standard-to-choose/> (dostęp: 14.03.2025).
67. <https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-14067-2018-10e.html> (dostęp: 14.03.2025).
68. Greenhouse Gas Protocol 2015.
69. <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/slady-weglowe-obliczanie-Atmoterm-10537.html> (dostęp: 14.03.2025).
70. Szymalski, W.; Bukowicka, K. *Jak przedsiębiorstwa mogą lepiej liczyć ślad węglowy?*; Fundacja Instytut na rzecz Ekorozwoju, 2022;
71. Świetlik, R.; Molik, A.; Piotrowski, T. Ocena cyklu życia - znormalizowana technika zarządzania środowiskowego. *Ekol. Tech.* 2011, R. 19, nr 6, 310–318.
72. <https://ecoinvent.org/database/> (dostęp: 14.03.2025).
73. <https://ghgprotocol.org/gabi-databases> (dostęp: 14.03.2025).
74. Oprogramowanie SimaPro 9.6.0 2020.
75. O'Sullivan *Decommissioning of Onshore Wind Turbines*; Wind Europe, 2020; pp. 30–46;.
76. <https://reglobal.org/decommissioning-of-onshore-wind-turbines/> (dostęp: 14.03.2025).
77. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa - Synchroniczna Prądnica Trójfazowa Napięcia Przemienneego Wzbudzana Magnesami Trwałymi 2020.
78. Rossa, R.; Pistelok, P. Generator z magnesami trwałymi do pracy w agregacie prądotwórczym. *Pr. Nauk. Inst. Masz. Napędów Pomiarów Elektr. Politech. Wroc. Stud. Mater.* 2012, Vol. 66, 176–181.
79. Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych PAN *Analiza Materiałowa Wybranych Elementów Generatora (10 Prób)*; Zabrze; 2024
80. Department of Applied Geology, Silesian University of Technology. 44-100 Gliwice. Poland.
81. <https://periodic-table.rsc.org/> (dostęp: 14.03.2025).
82. Marx, J.; Schreiber, A.; Zapp, P.; Walachowicz, F. Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent Magnet Production from Different Rare Earth Deposits. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2018, 6, 5858–5867, doi:10.1021/acssuschemeng.7b04165.
83. <https://emissioncalculator.ecotransit.world/> (dostęp: 14.03.2025).
84. https://www.ecotransit.org/wp-content/uploads/20240308_Methodology_Report_Update_2024.pdf (dostęp: 14.03.2025).
85. <https://calculator.carbonfootprint.com/calculator.aspx?lang=pl&tab=4> (dostęp: 24.03.2025).
86. <https://git.lukasiewicz.gov.pl/centrum-napedow-i-maszyn-elektrycznych-o-nas/> (dostęp: 24.03.2025).
87. <https://www.jednostek-miary.info/przelicz+Gigadzul+na+Kilowatogodzina.php> (dostęp: 24.03.2025).
88. <https://nowoczesnaflota.pl/aktualnosci/wydarzenia/renault-liderem-na-rynku-samochodow-dostawczych-w-polsce> (dostęp: 24.03.2025).
89. <https://dlabiznesu.renault.pl/samochody-dostawcze/trafic/konfigurator-lcv.html> (dostęp: 24.03.2025).

90. Ślad Węglowy i Cele Redukcji Emisji Gazów Ciepłarnianych - Podręcznik Deloitte 2023.
91. https://www.google.pl/maps/search/Serwis+Agregat%C3%B3w+Pr%C4%85dotw%C3%B3rczych/@51.5758864,19.361143,7.4z/data=!4m2!2m1!6e6!5m1!1e1?hl=pl&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDMxOS4yIKXMDSoJLDEwMjExNDUzSAFQA%3D%3D (dostęp: 24.03.2025).
92. Pietrzyk-Sokulska, E. Recykling jako potencjalne źródło pozyskiwania surowców mineralnych z wybranych grup odpadów. *Zesz. Nauk. Inst. Gospod. Surowcami Miner. Energii PAN* 2016, nr 92.
93. <https://www.rmbspa.pl/materiali/recupero-materiali.html> (dostęp: 26.03.2025).
94. Björkman, B.; Samuelsson, C. Recycling of Steel. In *Handbook of Recycling*; Elsevier, 2014; pp. 65–83 ISBN 978-0-12-396459-5.
95. *2020 LCI Study Report. Seventh Global LCI Study for Steel Products*; Worldsteel association, 2021;
96. *Low Carbon Roadmap. Pathways to a CO2-Neutral European Steel Industry*; EUROFER - The European Steel Association, 2019;
97. *Emissions Measurement and Data Collection for a Net Zero Steel Industry*; International Energy Agency, 2023;
98. <http://metalfierpolonia.kei.pl/website/pl/> (dostęp: 26.03.2025).
99. Pietrzyk, S.; Tora, B. Przetwórstwo wtórnych surowców metali nieżelaznych w Polsce – trendy, szanse i zagrożenia. *Inż. Miner.* 2017, R. 18, nr 2, doi:10.29227/IM-2017-02-09.
100. *Aluminum Beverage Can Recycling in 2021 at a New Record Level of 76%*; European Aluminum, 2024;
101. <https://grupakety.com/aluminium-metal-przyszlosci/> (dostęp: 26.03.2025).
102. <https://european-aluminium.eu/projets/a-low-carbon-footprint/> (dostęp: 26.03.2025).
103. <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-aluminium-sector/> (dostęp: 24.03.2025).
104. Saleem, J.; Tahir, F.; Baig, M.Z.K.; Al-Ansari, T.; McKay, G. Assessing the Environmental Footprint of Recycled Plastic Pellets: A Life-Cycle Assessment Perspective. *Environ. Technol. Innov.* 2023, 32, 103289, doi:10.1016/j.eti.2023.103289.
105. Kijeński, J.; Polaczek, J. Recykling odpadów tworzyw sztucznych w Polsce. Wczoraj, dziś, jutro. *Inż. Mater.* 2005, Vol. 26, 40–44.
106. <https://www.dulawa.eu/> (dostęp: 26.03.2025).
107. Vlasopoulos, A.; Malinauskaite, J.; Żabnieńska-Góra, A.; Jouhara, H. Life Cycle Assessment of Plastic Waste and Energy Recovery. *Energy* 2023, 277, 127576, doi:10.1016/j.energy.2023.127576.
108. <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/> (dostęp: 26.03.2025).
109. *The New Plastics Economy: Rethinking the Future of Plastics*; Ellen MacArthur Foundation, 2016;
110. <https://www.spg-pack.com/pl/blog/slady-weglowy-plastiku/> (dostęp: 26.03.2025).
111. Nuss, P.; Eckelman, M.J. Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. *PLoS ONE* 2014, 9, e101298, doi:10.1371/journal.pone.0101298.
112. <https://www.metalurgia.pl/kim-jestesmy> (dostęp: 26.03.2025).
113. Lu, Y.; Xu, Z. Precious Metals Recovery from Waste Printed Circuit Boards: A Review for Current Status and Perspective. *Resour. Conserv. Recycl.* 2016, 113, 28–39, doi:10.1016/j.resconrec.2016.05.007.
114. <https://www.carbonchain.com/blog/understand-your-copper-emissions> (dostęp: 26.03.2025).
115. Tuazon, V. *Copper Environmental Profile*; International Copper Association, 2023;
116. Fietz, M. Makulatura – Pochodzenie, Przerób, Wykorzystanie / Waste Paper – Origin, Processing, Usage. *Int. J. Food Sci. Bioprocess.* 2016, doi:10.15611/ijfsb.2016.1.04.

117. <https://www.topsa.pl/o-firmie> (dostęp: 26.03.2025).
118. Laurijssen, J.; Marsidi, M.; Westenbroek, A.; Worrell, E.; Faaij, A. Paper and Biomass for Energy? *Resour. Conserv. Recycl.* 2010, *54*, 1208–1218, doi:10.1016/j.resconrec.2010.03.016.
119. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks> (dostęp: 26.03.2025).
120. *Sustainability Report*; International Paper, 2023;
121. Liu, Z.W. New Developments in NdFeB-Based Permanent Magnets. *Key Eng. Mater.* 2012, *510–511*, 1–8, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.510-511.1.
122. Chen, Z.H.; Chen, J.Q.; Cheng, S.W.; Xiong, Y.X.; Wei, K. Study on Quantitative Pulse Magnetization of NdFeB. In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD); IEEE: Shanghai, China, November 2015; pp. 393–394.
123. Novák, M.; Ferková, Ž. Two-Pulse Magnetization Process of the NdFeB Multi-Pole Ring Magnet for BLDC Motors. *Electr. Eng.* 2020, *102*, 2315–2323, doi:10.1007/s00202-020-01003-9.
124. <https://www.pzk-magnesy.pl/magnesowanie-impulsowe> (dostęp: 26.03.2025).
125. Yang, Y.; Walton, A.; Sheridan, R.; Güth, K.; Gauß, R.; Gutfleisch, O.; Buchert, M.; Steenari, B.-M.; Van Gerven, T.; Jones, P.T.; et al. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *J. Sustain. Metall.* 2017, *3*, 122–149, doi:10.1007/s40831-016-0090-4.
126. <https://dhit.pl/blog/recykling-magnesow/> (dostęp: 26.03.2025).
127. Klemettinen, A.; Adamski, Z.; Leśniewicz, A.; Rycerz, L. Semicontinuous Process of Rare Earths Recovery from End-of-Life NdFeB Magnets on a Large Laboratory Scale. *Minerals* 2023, *13*, 862, doi:10.3390/min13070862.
128. <https://elementalsm.pl/strona/o-nas,4> (dostęp: 27.03.2025).
129. Jones, W. *Resource Efficient Production Route for Rare Earth Magnets (REProMag)*; REProMag consortium: Germany, 2017;
130. Schmidt, M.; Spieth, H.; Haubach, C.; Kühne, C. REProMag – Resource-Efficient Production of Magnets. In *100 Pioneers in Efficient Resource Management*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2019; pp. 342–345 ISBN 978-3-662-56744-9.
131. Walton, A.; Yi, H.; Rowson, N.A.; Speight, J.D.; Mann, V.S.J.; Sheridan, R.S.; Bradshaw, A.; Harris, I.R.; Williams, A.J. The Use of Hydrogen to Separate and Recycle Neodymium–Iron–Boron-Type Magnets from Electronic Waste. *J. Clean. Prod.* 2015, *104*, 236–241, doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.033.
132. Grau, L.; Fleissner, P.; Kobe, S.; Burkhardt, C. Processability and Separability of Commercial Anti-Corrosion Coatings Produced by In Situ Hydrogen-Processing of Magnetic Scrap (HPMS) Recycling of NdFeB. *Materials* 2024, *17*, 2487, doi:10.3390/ma17112487.
133. Rigamonti, F. Life Cycle Assessment of Innovative NdFeB Magnets Recycling Techniques: Spark Plasma Sintering and 3D Printing. 2023.
134. Białasz, S. Practice Use of Rubber Recyclates, as a Way to Protect the Environment. *Inż. Ekol.* 2018, *19*, 63–74, doi:10.12912/23920629/94958.
135. <https://www.focus.pl/artukul/klej-o-odwracalnych-wlasciwosciach-recykling> (dostęp: 27.03.2025).
136. Myhre, M.; Saiwari, S.; Dierkes, W.; Noordermeer, J. RUBBER RECYCLING: CHEMISTRY, PROCESSING, AND APPLICATIONS. *Rubber Chem. Technol.* 2012, *85*, 408–449, doi:10.5254/rct.12.87973.
137. <https://powerrubber.com/recykling-odpadow-gumowych-jak-to-sie-robi/> (dostęp: 27.03.2025).

138. <https://gran-tech.com.pl/pelny-recykling/> (dostęp: 27.03.2025).
139. Rincón, L.; Coma, J.; Pérez, G.; Castell, A.; Boer, D.; Cabeza, L.F. Environmental Performance of Recycled Rubber as Drainage Layer in Extensive Green Roofs. A Comparative Life Cycle Assessment. *Build. Environ.* 2014, 74, 22–30, doi:10.1016/j.buildenv.2014.01.001.
140. Dong, Y.; Zhao, Y.; Hossain, Md.U.; He, Y.; Liu, P. Life Cycle Assessment of Vehicle Tires: A Systematic Review. *Clean. Environ. Syst.* 2021, 2, 100033, doi:10.1016/j.cesys.2021.100033.
141. Marques, A.; Mocanu, A.; Tomić, N.; Balos, S.; Stammen, E.; Lundevall, A.; Abrahamsi, S.; Günther, R.; De Kok, J.; Teixeira De Freitas, S. Review on Adhesives and Surface Treatments for Structural Applications: Recent Developments on Sustainability and Implementation for Metal and Composite Substrates. *Materials* 2020, 13, 5590, doi:10.3390/ma13245590.
142. Schelte, N.; Hendrickx, B.; Severengiz, S. Life-Cycle Based Evaluation of the Environmental Impact of Chemical Recycling vs. Combined Waste-to-Energy and Carbon-Capture-and-Utilization for Selected Epoxy Resins. *Procedia CIRP* 2023, 116, 660–665, doi:10.1016/j.procir.2023.02.111.
143. Packham, D.E. The Environmental Impact of Adhesives. In *Eco-efficient Construction and Building Materials*; Elsevier, 2014; pp. 338–367 ISBN 978-0-85709-767-5.
144. Kowol, D.; Baron, R. *Materiał Niepublikowany ITG KOMAG “Opracowanie Koncepcji Układu Technologicznego Do Wytwarzania Produktów Kompozytowych w Oparciu o Analizę Ilościowo-Jakościową Strumieni Odpadów, w Tym Drewnianych”*; Gliwice, 2023;
145. Baron, R.; Friebe, P.; Matusiak, P.; Kowol, D.; Suponik, T.; Lutyński, M. Rozdział Surowców Zawierających Pierwiatki Ziem Rzadkich w Procesach Przesiewania i Separacji Magnetycznej. *Inż. Miner.* 2024, 2, doi:10.29227/IM-2024-01-113.
146. <https://eko-blog.pl/ile-energii-moze-wyprodukowac-pojedyncza-turbina-wiatrowa/> (dostęp: 27.03.2025).
147. https://web.archive.org/web/20110724121611/http://www.juwi.de/fileadmin/user_upload/de/PK_2011/juwi/Hintergrund%20Repowering%20Schneebergerhof%20E%20126.pdf (dostęp: 27.03.2025).

Wykaz wybranych oznaczeń i skrótów

Wybrane oznaczenia

- t – czas
- m – masa
- P - ciśnienie
- Φ - strumień magnetyczny
- S – moc
- U – napięcie
- $\cos\varphi$ – współczynnik mocy
- η – sprawność
- f – częstotliwość
- E – ślad węglowy generatora
- α – intensywność emisyjną względem masy
- n – liczbę turbin w farmie

Wybrane skróty

- *LCA* – ang. *Life Cycle Assessment* (ocena cyklu życia)
- *GHG* – ang. *Greenhouse Gases* (gazy cieplarniane)
- *CF* - ang. *carbon footprint* (śląd węglowy)
- *REE* – ang. *Rare Earth Elements* (pierwiastki ziem rzadkich)
- *REO* – ang. *Rare Earth Oxides* (tlenki metali ziem rzadkich)
- *WEEE* – ang. *Waste Electrical and Electronic Equipment* (odpady elektryczne i elektroniczne)
- *FTIR* – ang. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (spektroskopia fourierowska w podczerwieni)
- *ICP-MS* – ang. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (spektrometria mas z plazmą indukcyjnie sprzężoną)
- *OZE* - Odnawialnych Źródeł Energii
- *GOZ* - Gospodarka o Obiegu Zamkniętym
- *CO₂ eq* – Ekwiwalent Dwutlenku Węgla
- *ITG KOMAG* – Instytut Techniki Górniczej KOMAG
- *KOMEL* – Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych (były Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL)
- *NdFeB* – neodym-żelazo-bor
- *PMG* - Permanent Magnet Generator

Spis tabel:

Tabela 1. Materiały możliwe do recyklingu na przykładzie farmy turbin wiatrowych o mocy 60 MW [38]	19
Tabela 2. Zakresy obejmujące analizę cyklu życia generatora [opracowanie własne]	42
Tabela 3. Dane wejściowe i wyjściowe dla LCA generatora [opracowanie własne]	44
Tabela 4. Podstawowe parametry techniczne generatora [77]	52
Tabela 5. Udział poszczególnych grup materiałowych wchodzących w skład generatora [opracowanie własne]	59
Tabela 6. Wyniki zawartości wyznaczonych pierwiastków w magnesach NdFeB [80]	62
Tabela 7. Ocena ryzyka utraty dostaw, wskaźnika recyklingu oraz stopienia zastępowalności magnesów NdFeB [81]	63
Tabela 8. Wyniki analizy LCA magnesów NdFeB [82]	77
Tabela 9. Wyniki wartości śladu węglowego związane z produkcją oraz dostarczeniem gotowych komponentów do przedsiębiorstwa KOMEL [opracowanie własne]	83
Tabela 10. Wyniki wartości śladu węglowego obejmujące pozostałe etapy cyklu życia generatora [opracowanie własne]	85
Tabela 11. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych scenariuszy transportu w analizie wrażliwości [opracowanie własne]	94
Tabela 12. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów produkcji elementów stalowych generatora pochodzących z recyklingu złomu [opracowanie własne]	105
Tabela 13. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów produkcji elementów aluminiowych generatora pochodzących z recyklingu złomu [opracowanie własne]	109
Tabela 14. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów produkcji elementów z tworzywa sztucznego generatora pochodzących z recyklingu [opracowanie własne]	113
Tabela 15. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów produkcji elementów miedzianych generatora pochodzących z recyklingu [opracowanie własne]	117
Tabela 16. Wyniki wartości śladu węglowego dla poszczególnych etapów produkcji elementów papierowych generatora pochodzących z recyklingu [opracowanie własne]	121
Tabela 17. Wyniki parametrów środowiskowych związanych z recyklingiem magnesów neodymowych (metoda magnet-to-magnet) [44]	130
Tabela 18. Wyniki parametrów środowiskowych związanych z recyklingiem magnesów neodymowych (metoda wykorzystująca druk 3D) [129]	134
Tabela 19. Redukcja wartości śladu węglowego dla materiałów poddawanych powszechnie recyklingowi [opracowanie własne]	135
Tabela 20. Redukcja wartości śladu węglowego związana z zagospodarowaniem magnesów neodymowych [opracowanie własne]	136
Tabela 21. Dobrane parametry separatora elektrostatycznego dla separacji I stopnia [opracowanie własne]	147
Tabela 22. Dobrane parametry separatora elektrostatycznego dla separacji II stopnia [opracowanie własne]	147
Tabela 23. Wychody masowe uzyskane z separacji elektrostatycznej [opracowanie własne]	148

Spis rysunków:

Rys.1. Podstawowe elementy turbiny wiatrowej [opracowanie własne]	13
Rys.2. Konwersja energii wiatru na łopatkę turbiny wiatrowej [opracowanie własne]	14
Rys.3. Budowa turbiny wiatrowej [22]	14
Rys.4. Turbina wiatrowa z generatorem synchronicznym [22]	15
Rys.5. Generator asynchroniczny [22]	15
Rys.6. Pierwiastki ziem rzadkich [opracowanie własne]	24
Rys.7. Schemat wytwarzania spiekanych magnesów neodymowych [opracowanie własne na podstawie 50]	26
Rys.8. Wytwarzanie taśmy metalicznej w metodzie szybkiego chłodzenia ze stanu ciekłego [opracowanie własne na podstawie 50]	27
Rys.9. Etapy recyklingu magnesów NdFeB [opracowanie własne na podstawie 51]	29
Rys.10. Liczba turbin wiatrowych z generatorem magnesu trwałego osiągających koniec życia każdego roku do 2050 roku [opracowanie własne na podstawie 37]	31
Rys.11. Szacunkowe zapotrzebowanie na wybrane REE do generatorów turbin wiatrowych, silników pojazdów elektrycznych i innych sektorów, według scenariuszy niskiego i wysokiego zapotrzebowania [opracowanie własne na podstawie 37]	32
Rys.12. Stosunek popytu/podaży neodymu, prazeodymu, dysprozu i terbu według scenariuszy niskiego i wysokiego zapotrzebowania [opracowanie własne na podstawie 37]	32
Rys.13. Etapy wzięte pod uwagę w ocenie życia generatora [opracowanie własne]	41
Rys.14. Schemat cyklu życia generatora [opracowanie własne]	44
Rys.15. LCA magnesów neodymowych począwszy od wydobycia surowca do montażu w generatorze [opracowanie własne]	46
Rys.16. Generator KOMEL - PMzg132-8B [opracowanie własne]	52
Rys.17. Wysuwanie magnesów trwałych [opracowanie własne]	54
Rys.18. Demontaż magnesów NdFeB z wykorzystaniem palnika gazowego [opracowanie własne]	55
Rys.19. Usuwanie laminatu z rowków stojanach [opracowanie własne]	55
Rys.20. Analizowane próbki tworzyw sztucznych. [opracowanie własne]	57
Rys.21. Widmo ATR-FTIR - Próbką 1 [79]	58
Rys.22. Elementy stalowe generatora [opracowanie własne]	60
Rys.23. Elementy aluminiowe generatora [opracowanie własne]	60
Rys.24. Magnesy trwałe NdFeB [opracowanie własne]	60
Rys.25. Pokrywy generatora z tworzywa sztucznego [opracowanie własne]	60
Rys.26. Wypełnienie rowków stojana [opracowanie własne]	60
Rys.27. Uzwojenie miedziane stojana [opracowanie własne]	60
Rys.28. Elementy gumowe generatora [opracowanie własne]	60
Rys.29. Papier z rowków stojana [opracowanie własne]	60
Rys.30. Pozostałe materiały – kleje, żywice [opracowanie własne]	61
Rys.31. Mieszanina drobnych materiałów powstała w wyniku demontażu [opracowanie własne]	61
Rys.32. Kruszarka laboratoryjna Mawo-tech MKL1x1,5 [opracowanie własne]	62
Rys.33. Młynek laboratoryjny [opracowanie własne]	62
Rys.34. Rozkład wyznaczonych pierwiastków w magnesach NdFeB [opracowanie własne]	63
Rys.35. Schemat produkcji magnesów neodymowych z pierwotnie wydobytych surowców [opracowanie własne na podstawie 44]	66

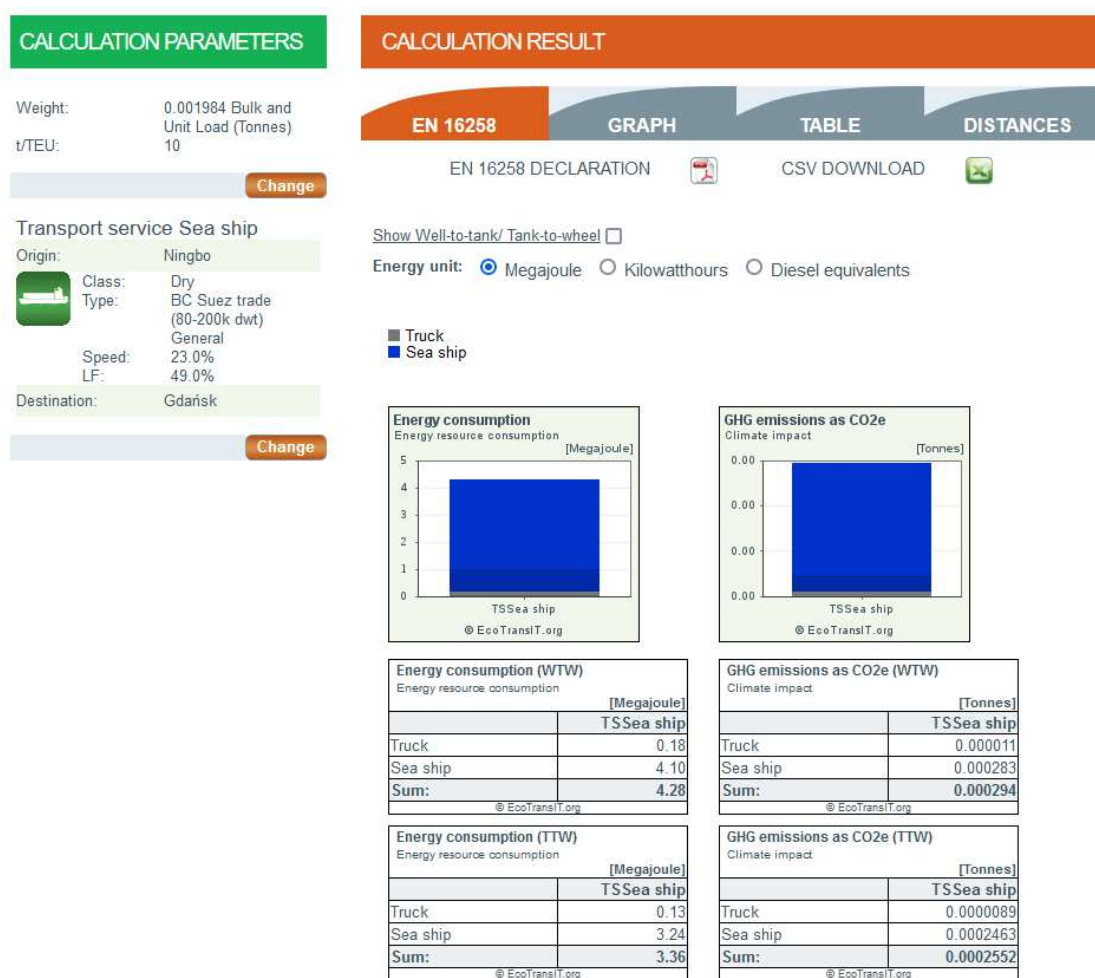
Rys.36. Schemat produkcji magnesów neodymowych z recyklingu [opracowanie własne na podstawie 44]	67
Rys.37. Schemat przedstawiający scenariusz cyklu życia generatora wraz z charakterystyką pochodzenia danych [opracowanie własne]	69
Rys.38. Wybrane etapy cyklu życia generatora z odnośnikami do opisów pochodzenia danych, które opisane są w podrozdziale 8.1 pracy [opracowanie własne]	70
Rys.39. Transport magnesów neodymowych z portu w ChRL do portu w Polsce [83]	71
Rys.40. Transport magnesów neodymowych z portu w Polsce do pośrednika sprzedaży w Olsztynie [opracowanie własne]	72
Rys.41. Transport magnesów neodymowych od pośrednika Mistral do firmy KOMEL [opracowanie własne]	72
Rys.42. Wartości śladu węglowego uzyskane z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro [opracowanie własne na podstawie 74]	76
Rys.43. Sieć serwisantów generatorów prądotwórczych na przestrzeni kraju [opracowanie własne]	81
Rys.44. Porównanie jednostkowej wartości śladu węglowego do masy poszczególnych elementów [opracowanie własne]	84
Rys.45. Udział procentowy wartości śladu węglowego dla poszczególnych elementów [opracowanie własne]	85
Rys.46. Schemat wartości śladu węglowego w LCA generatora obejmujący procesy produkcyjne, użytkowanie oraz demontaż [opracowanie własne]	86
Rys.47. Wyznaczone trasy dla wytypowanych środków transportu w analizie wrażliwości [opracowanie własne]	88
Rys.48. Trasa konieczna do pokonania przez magnesy neodymowe z wykorzystaniem transportu kolejowego [83]	90
Rys.49. Trasa konieczna do pokonania przez magnesy neodymowe z wykorzystaniem żeglugi śródlądowej [83]	91
Rys.50. Trasa konieczna do pokonania przez magnesy neodymowe z wykorzystaniem samolotu krótkiego zasięgu [83]	93
Rys.51. Wartość śladu węglowego dla poszczególnych scenariuszy wykorzystania różnych środków transportu [opracowanie własne]	95
Rys.52. Rozkład wartości śladu węglowego dla poszczególnych scenariuszy wykorzystania różnych środków transportu [opracowanie własne]	96
Rys.53. Lokalizacja potencjalnych składowisk wyeksploatowanych elementów generatora [opracowanie własne]	98
Rys.54. Schemat LCA dla wybranych recyklingowanych elementów generatora [opracowanie własne]	100
Rys.55. Schemat LCA recyklingu stali [opracowanie własne]	102
Rys.56. Lokalizacja skupu rozpatrywanych elementów generatora przeznaczonych do recyklingu [opracowanie własne]	103
Rys.57. Schemat LCA recyklingu aluminium [opracowanie własne]	107
Rys.58. Schemat LCA recyklingu tworzyw sztucznych [opracowanie własne]	111
Rys.59. Schemat LCA recyklingu elementów miedzianych [opracowanie własne]	115
Rys.60. Schemat LCA recyklingu elementów papierowych [opracowanie własne]	119
Rys.61. Schemat LCA ponownego zastosowania magnesów NdFeB [opracowanie własne]	123
Rys.62. Schemat LCA odzysku REE i recyklingu magnesów NdFeB [opracowanie własne]	128
Rys.63. Schemat LCA recyklingu magnesów NdFeB [opracowanie własne]	132
Rys.64. Schemat LCA recyklingu elementów gumowych [opracowanie własne]	138

Rys.65. Schemat LCA recyklingu kleju [opracowanie własne]	141
Rys.66. Schemat LCA recyklingu mieszaniny elementów miedzianych i z tworzywa sztucznego[opracowanie własne]	145
Rys.67. Separator „Boxmag-Rapid [opracowanie własne]	147
Rys.68. Nadawa stanowiąca mieszaninę miedzi i tworzywa sztucznego [opracowanie własne]	147
Rys.69. Wychód miedzi [opracowanie własne]	148
Rys.70. Wychód tworzywa sztucznego [opracowanie własne]	148
Rys.71. Wykres porównawczy wartości śladu węglowego dla wybranych elementów generatora I [opracowanie własne]	151
Rys.72. Wykres porównawczy wartości śladu węglowego dla wybranych elementów generatora II [opracowanie własne]	152

Załączniki:

Załącznik 1 Obliczenia śladu węglowego

Załącznik 1 Obliczenia śladu węglowego:



Rys.1. Wyniki wartości śladu węglowego dla transportu magnezów NdFeB z ChRL do Polski

Droga w milach: 194 km

Wybierz pojazd: EU samochodowa baza danych

2018

RENAULT

[zresetuj](#) Trafic Euro6, 2016

Energy dCi 125 , M6

Lub wpisz wydajność: 175.305 g/km

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.03 ton CO₂ **Offset**

0.03 ton: 194 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.2. Wartość śladu węglowego na trasie Gdańsk – Olsztyn

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.09 ton CO₂

0.09 ton: 490 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.3. Wartość śladu węglowego na trasie Olsztyn – Sosnowiec

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.02 ton CO₂

0.02 ton: 100 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.4. Wartość śladu węglowego na trasie dystansie 50 km

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.09 ton CO₂

0.09 ton: 500 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)



Rys.5. Wartość śladu węglowego na trasie dystansie 250 km

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.18 ton CO₂

0.18 ton: 1000 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)



Rys.6. Wartość śladu węglowego na trasie dystansie 500 km

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.14 ton CO₂

0.14 ton: 800 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.7. Wartość śladu węglowego związana z serwisem generatora na trasie dystansie 800 km

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

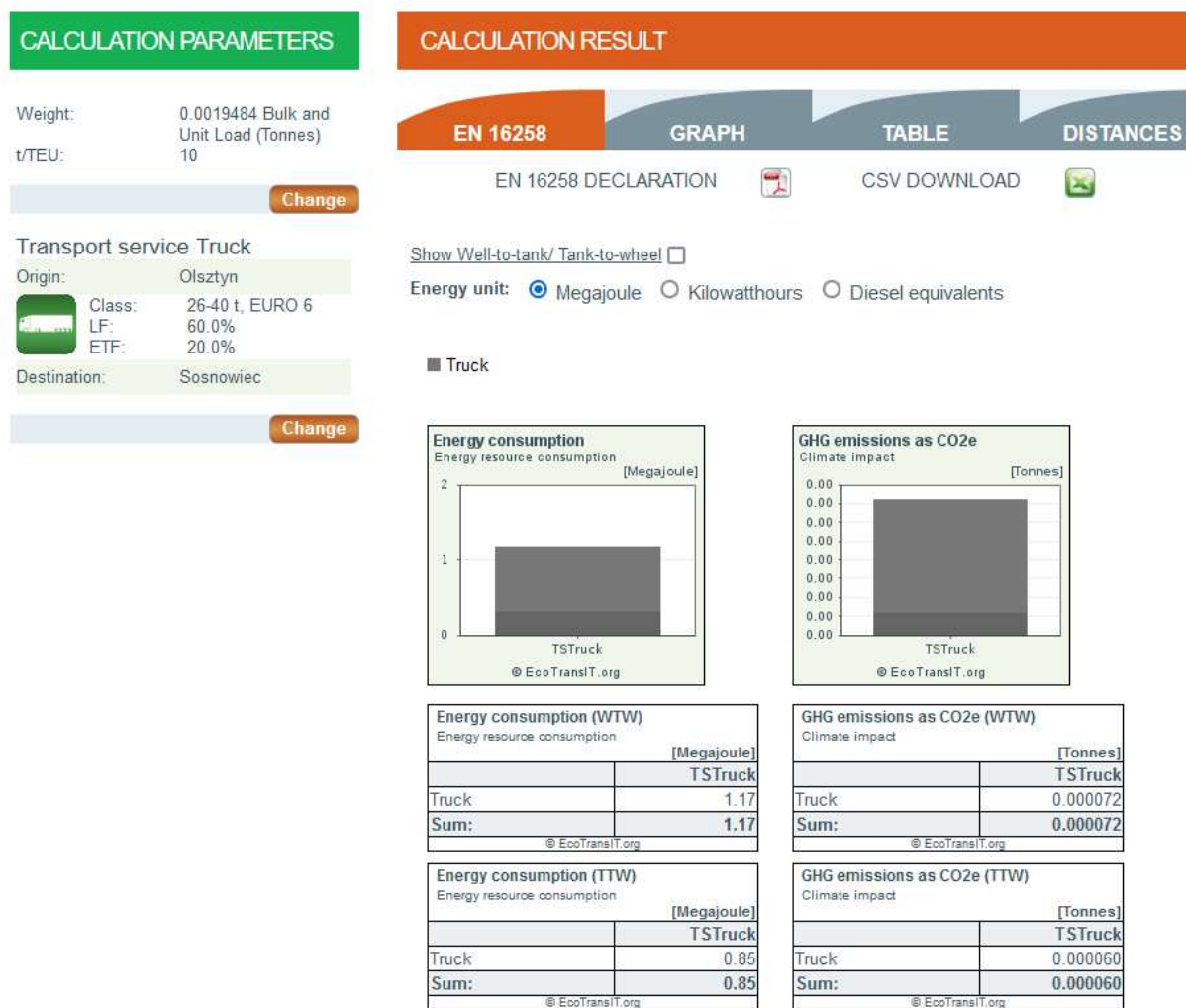
Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

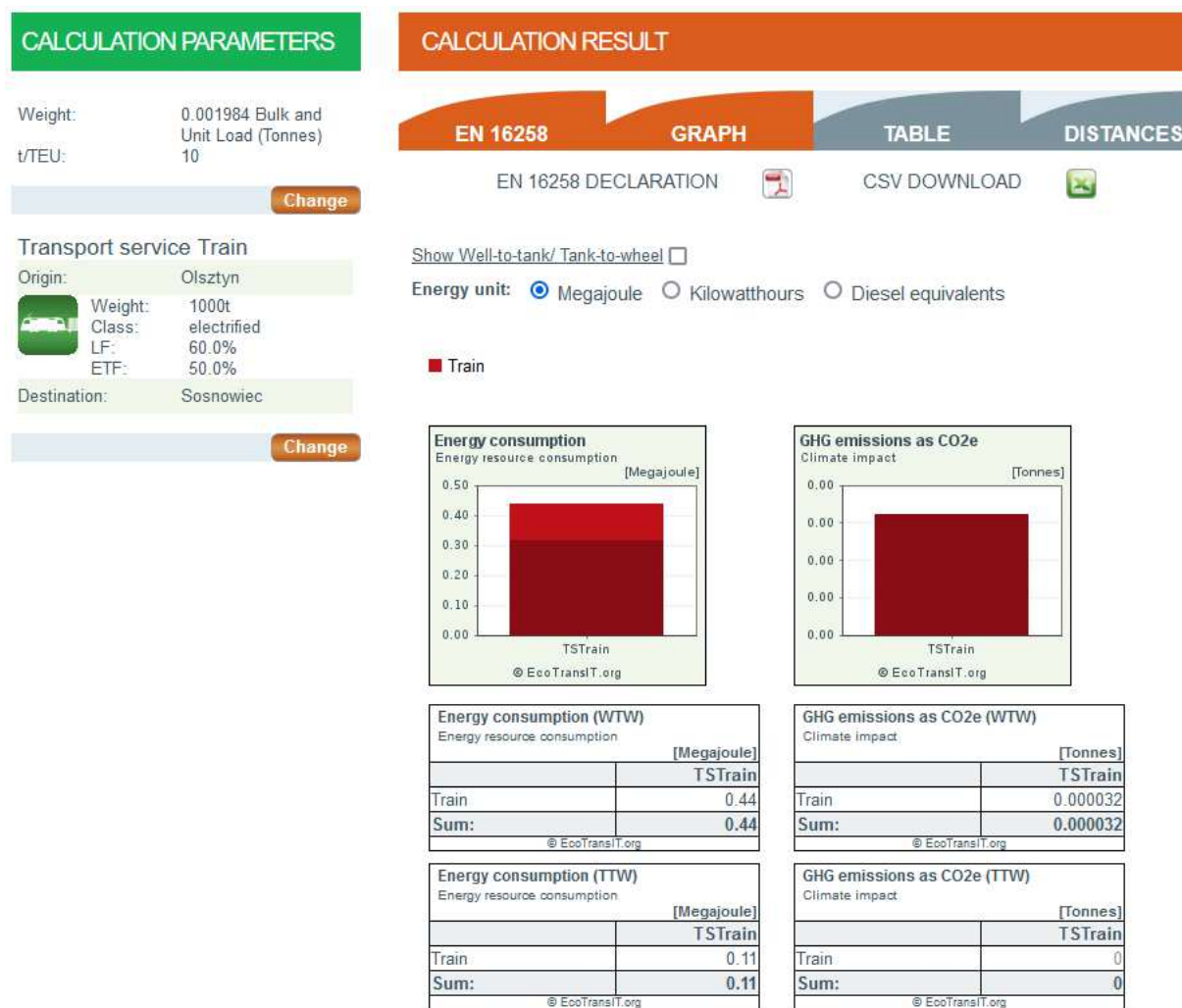
Suma Samochód Śladów = 0.09 ton CO₂

0.09 ton: 490 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

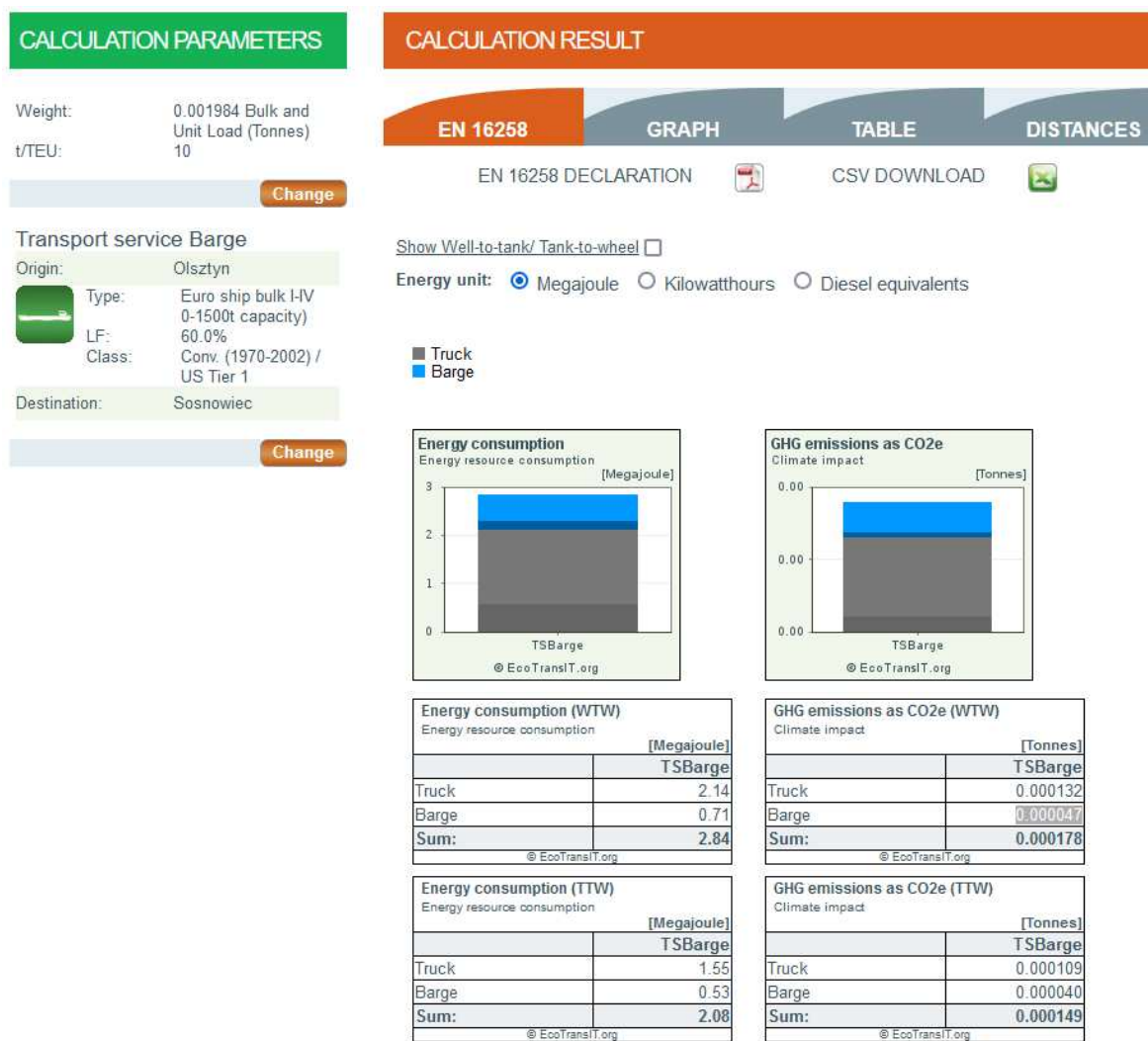
Rys.8. Wartość śladu węglowego w analizie wrażliwości dla samochodu dostawczego transportującego wyłącznie magnesy neodymowe



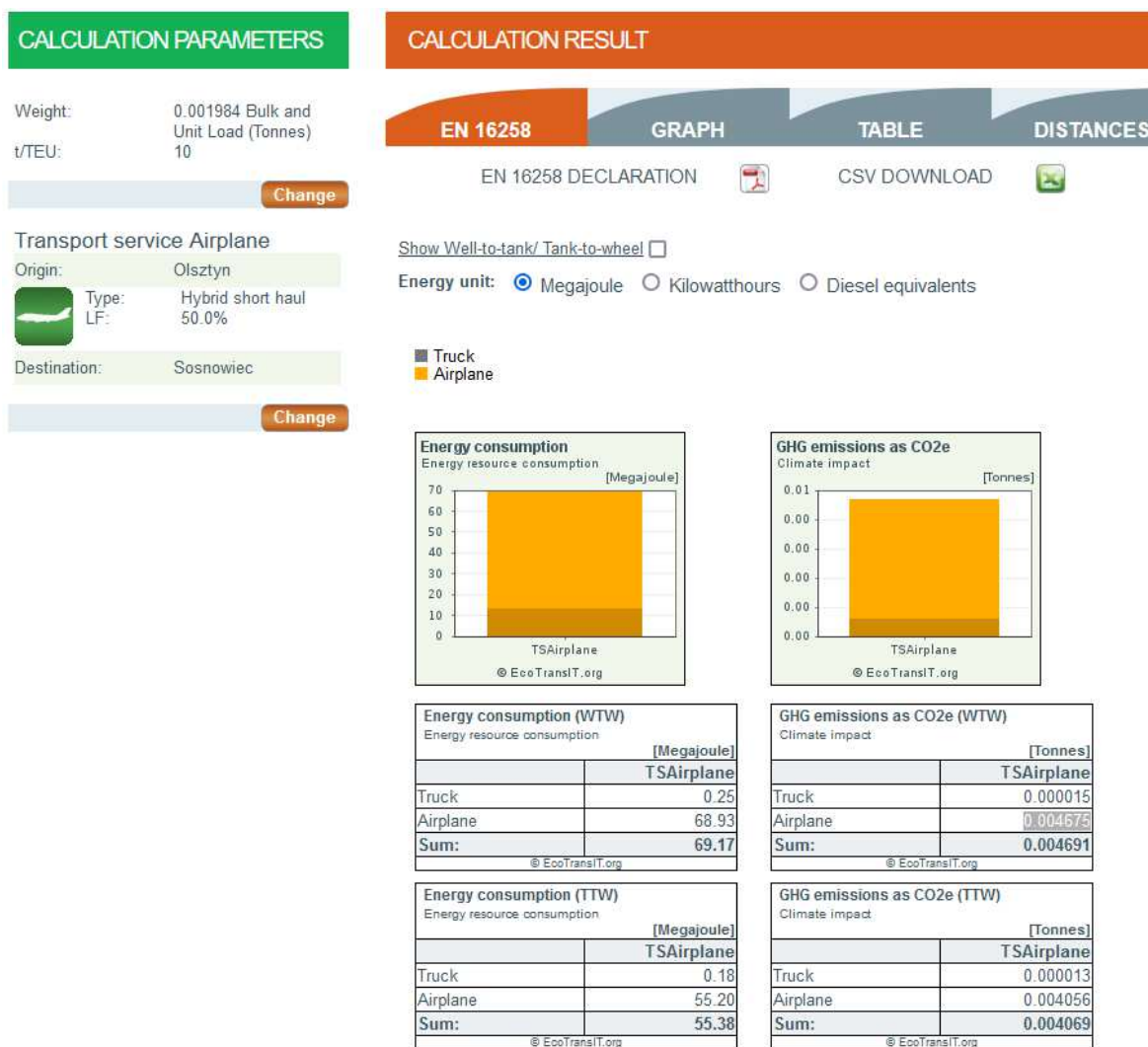
Rys.9. Wartość śladu węglowego w analizie wrażliwości dla samochodu ciężarowego



Rys.10. Wartość śladu węglowego w analizie wrażliwości dla transportu kolejowego



Rys.11. Wartość śladu węglowego w analizie wrażliwości dla transportu z wykorzystaniem żeglugi śródlądowej



Rys.12. Wartość śladu węglowego w analizie wrażliwości dla transportu z wykorzystaniem samolotu krótkiego zasięgu

Droga w milach: km ▼

Wybierz pojazd: EU samochodowa baza danych ▼

2018 ▼

RENAULT ▼

zresetuj Trafic Euro6, 2016 ▼

Energy dCi 125 , M6 ▼

Lub wpisz wydajność: g/km ▼

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.00 ton CO₂
Offset

0.00 ton: 20 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.13. Wartość śladu węglowego związana z transportem generatora do składowiska

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

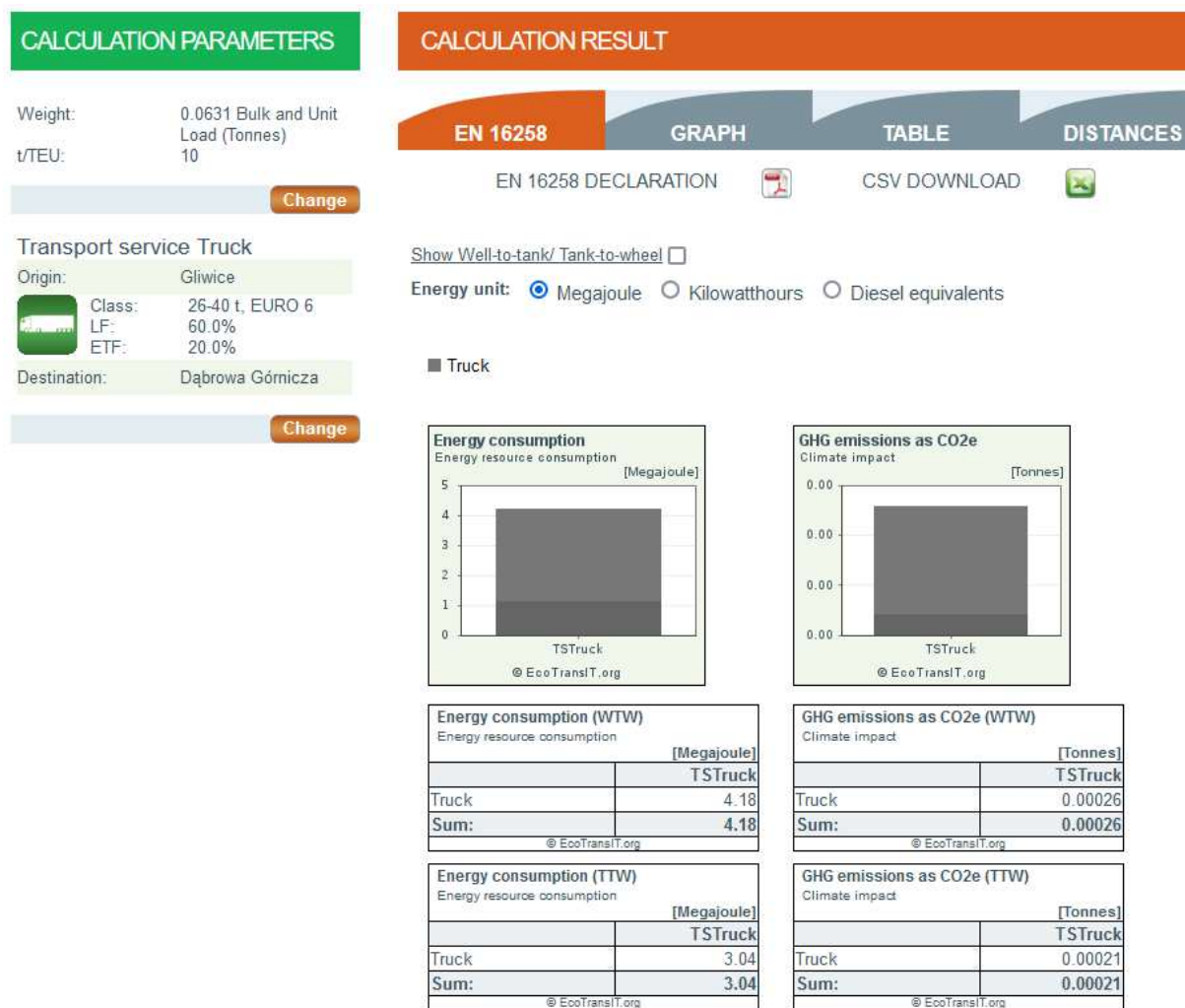
Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.00 ton CO₂ **Offset**

0.00 ton: 20 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.14. Wartość śladu węglowego związana z transportem elementów stalowych do jednostki skupującej złom



Rys.15. Wartość śladu węglowego dla transportu złomu stalowego do huty

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.02 ton CO₂ **Offset**

0.02 ton: 114 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.16. Wartość śladu węglowego związana z transportem produktów stalowych do przedsiębiorstwa KOMEL

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

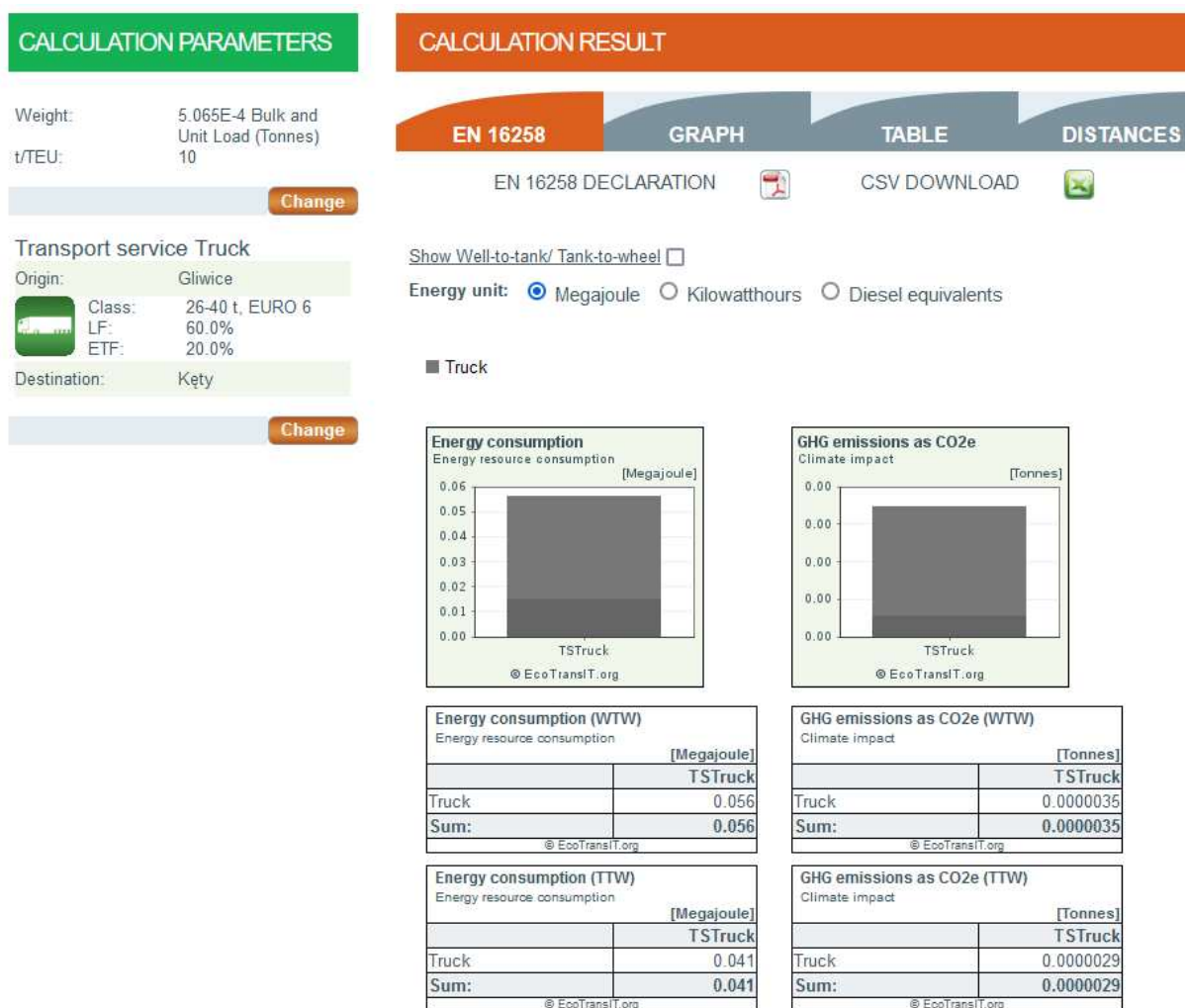
Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.00 ton CO₂ **Offset**

0.00 ton: 20 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.17. Wartość śladu węglowego związana z transportem elementów aluminiowej do jednostki skupującej złom



Rys.18. Wartość śladu węglowego dla transportu aluminium do zakładu produkcyjnego

Droga w milach: km *

Wybierz pojazd: EU samochodowa baza danych

2018

RENAULT

[zresetuj](#) Trafic Euro6, 2016

Energy dCi 125 , M6

Lub wpisz wydajność: g/km

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.02 ton CO₂
Offset

0.02 ton: 125 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.19. Wartość śladu węglowego związana z transportem produktów aluminiowych do przedsiębiorstwa KOMEL

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

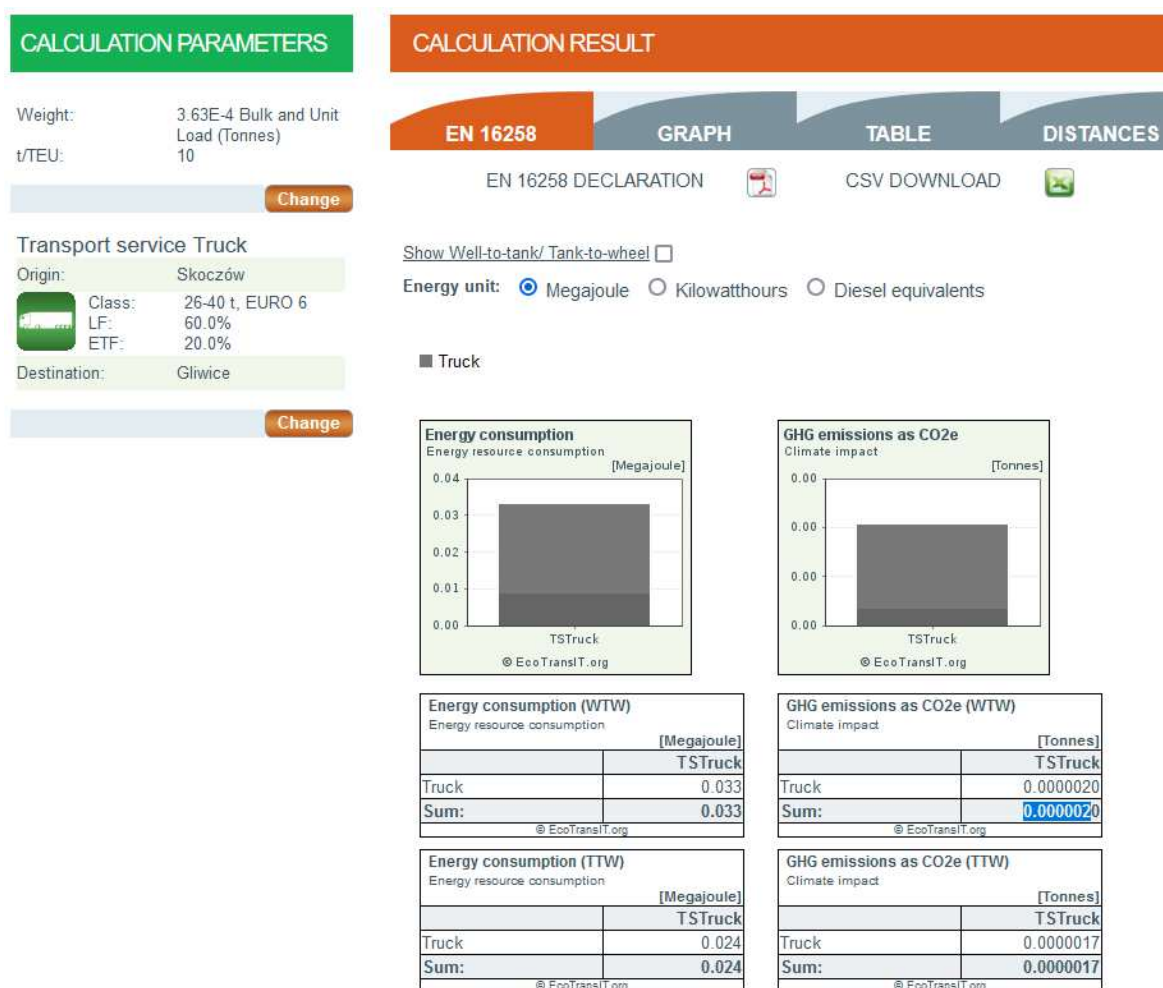
Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.00 ton CO₂

0.00 ton: 20 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.20. Wartość śladu węglowego związana z transportem z tworzywa sztucznego do punktu odbioru



Rys.21. Wartość śladu węglowego dla transportu tworzyw sztucznych do zakładu produkcyjnego

Droga w milach: *

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.03 ton CO₂ **Offset**

0.03 ton: 160 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.22. Wartość śladu węglowego związana z transportem produktów z tworzywa sztucznego do przedsiębiorstwa KOMEL

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

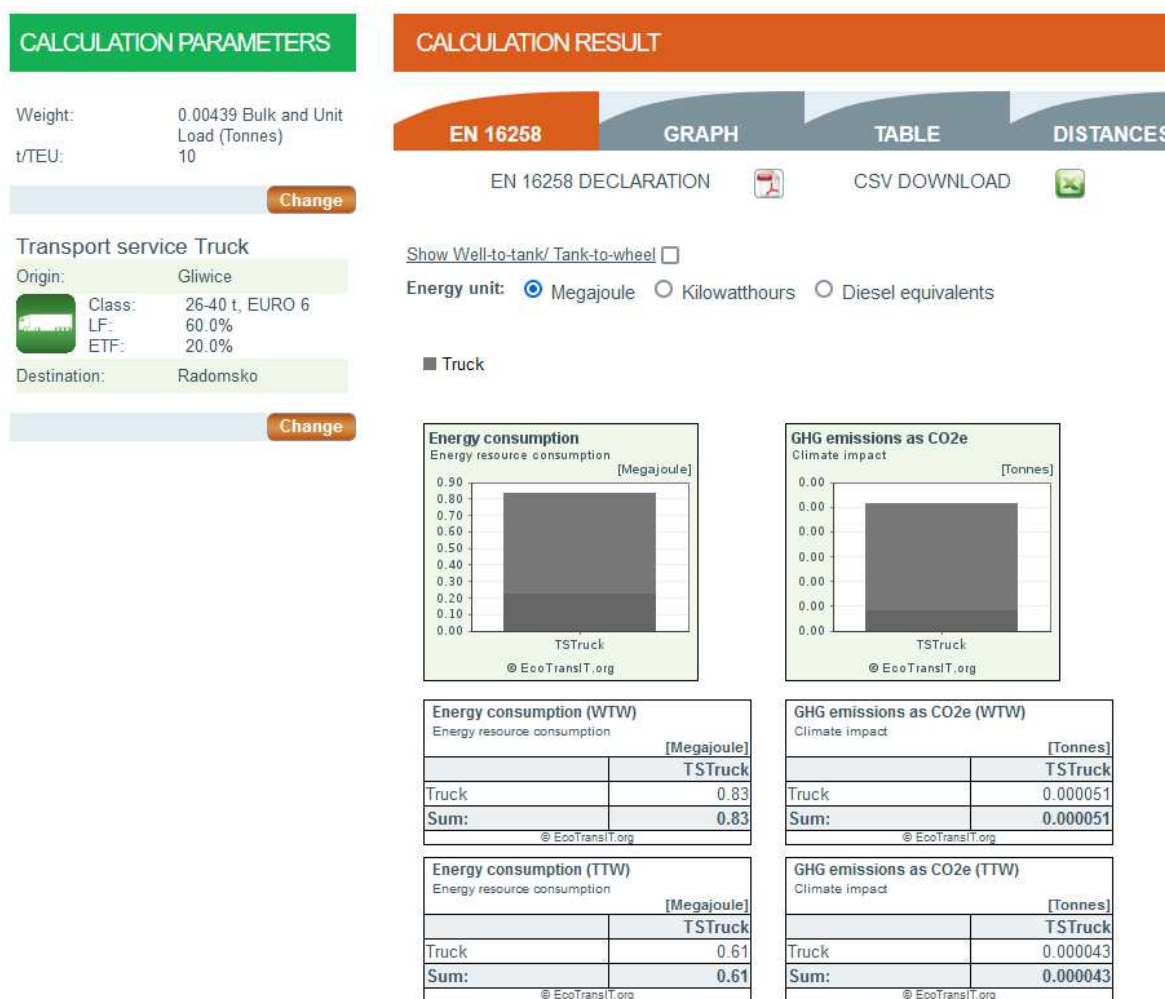
Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.00 ton CO₂ **Offset**

0.00 ton: 20 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.23. Wartość śladu węglowego związana z transportem elementów miedzianych do skupu metali



Rys.24. Wartość śladu węglowego dla transportu elementów miedzianych do zakładu produkcyjnego

Droga w milach: km

Wybierz pojazd: EU samochodowa baza danych

2018

RENAULT

[zresetuj](#) Trafic Euro6, 2016

Energy dCi 125 , M6

Lub wpisz wydajność: g/km

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.04 ton CO₂
Offset

0.04 ton: 244 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.25. Wartość śladu węglowego związana z transportem produktów z miedzi do przedsiębiorstwa KOMEL

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

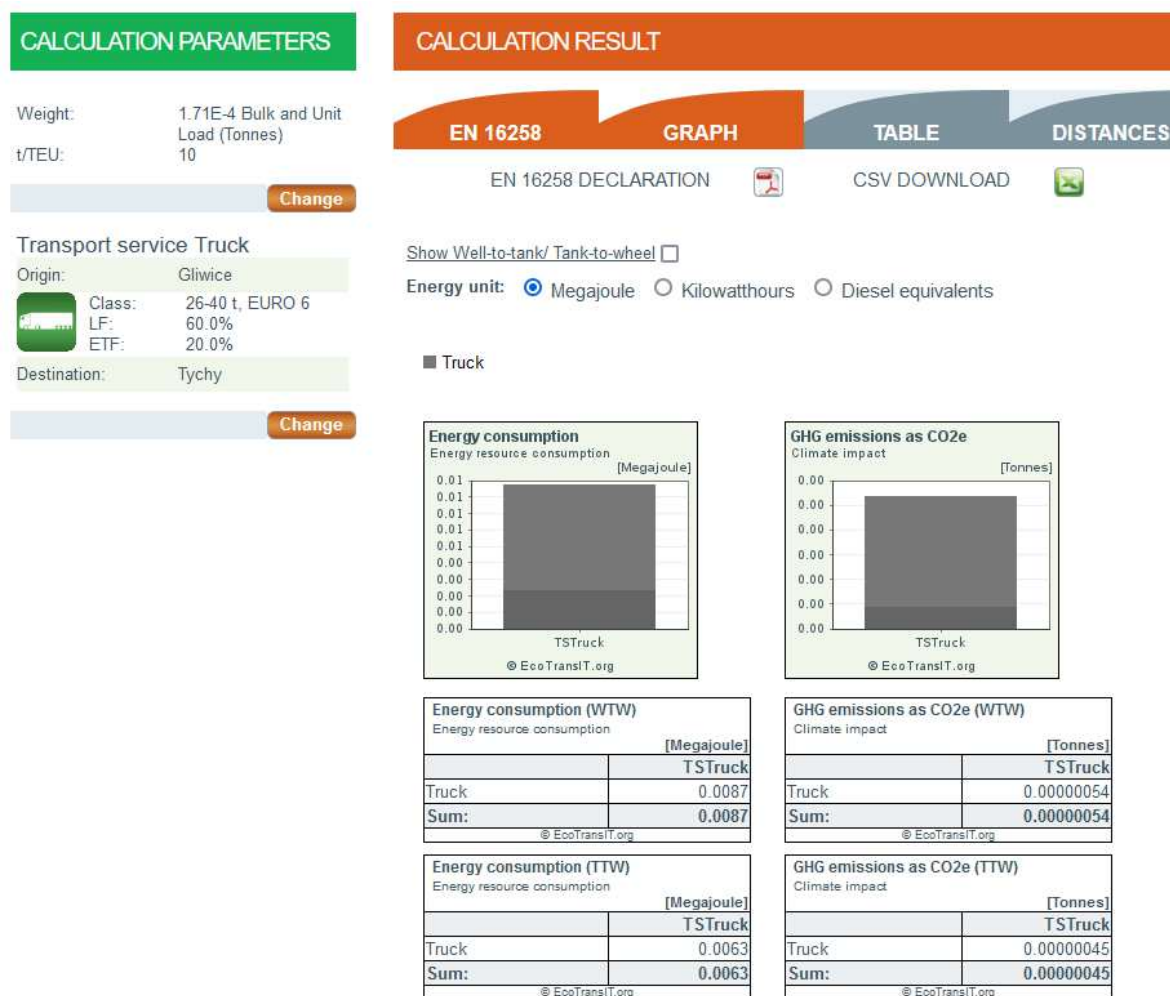
Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.00 ton CO₂

0.00 ton: 20 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.26. Wartość śladu węglowego związana z transportem elementów papierowych do skupu makulatury



Rys.27. Wartość śladu węglowego dla transportu makulatury do zakładu produkcyjnego

Droga w milach: *

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.01 ton CO₂ **Offset**

0.01 ton: 36 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.28. Wartość śladu węglowego związana z transportem produktów papierowych do przedsiębiorstwa KOMEL

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.00 ton CO₂ **Offset**

0.00 ton: 20 km w EU 2015 SKODA Octavia Estate 1.6 TDI 105PS Stop-Start, M6 [usuń](#)

Rys.29. Obliczenia wartości śladu węglowego związanego z dojazdem pracowników (wykonanie operacji kontrolno-przygotowawcze zdemontowanych magnesów NdFeB)

Droga w milach: ▼

Wybierz pojazd: ▼

▼

▼

[zresetuj](#) ▼

▼

Lub wpisz wydajność: ▼

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.01 ton CO₂

0.01 ton: 76 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.30. Obliczenia wartości śladu węglowego związanego z transportem magnesów NdFeB do zakładu PZK Brno

Droga w milach: ▼ *

Wybierz pojazd: ▼

▼

▼

[zresetuj](#) ▼

▼

Lub wpisz wydajność: ▼

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.00 ton CO₂

0.00 ton: 6 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.31. Wartość śladu węglowego związana z transportem namagnesowanych magnesów do przedsiębiorstwa KOMEL

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.03 ton CO₂ **Offset**

0.03 ton: 148 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.32. Obliczenia wartości śladu węglowego związanego z transportem magnezów NdFeB do zakładu Elemental Strategic Metals

Droga w milach: *

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

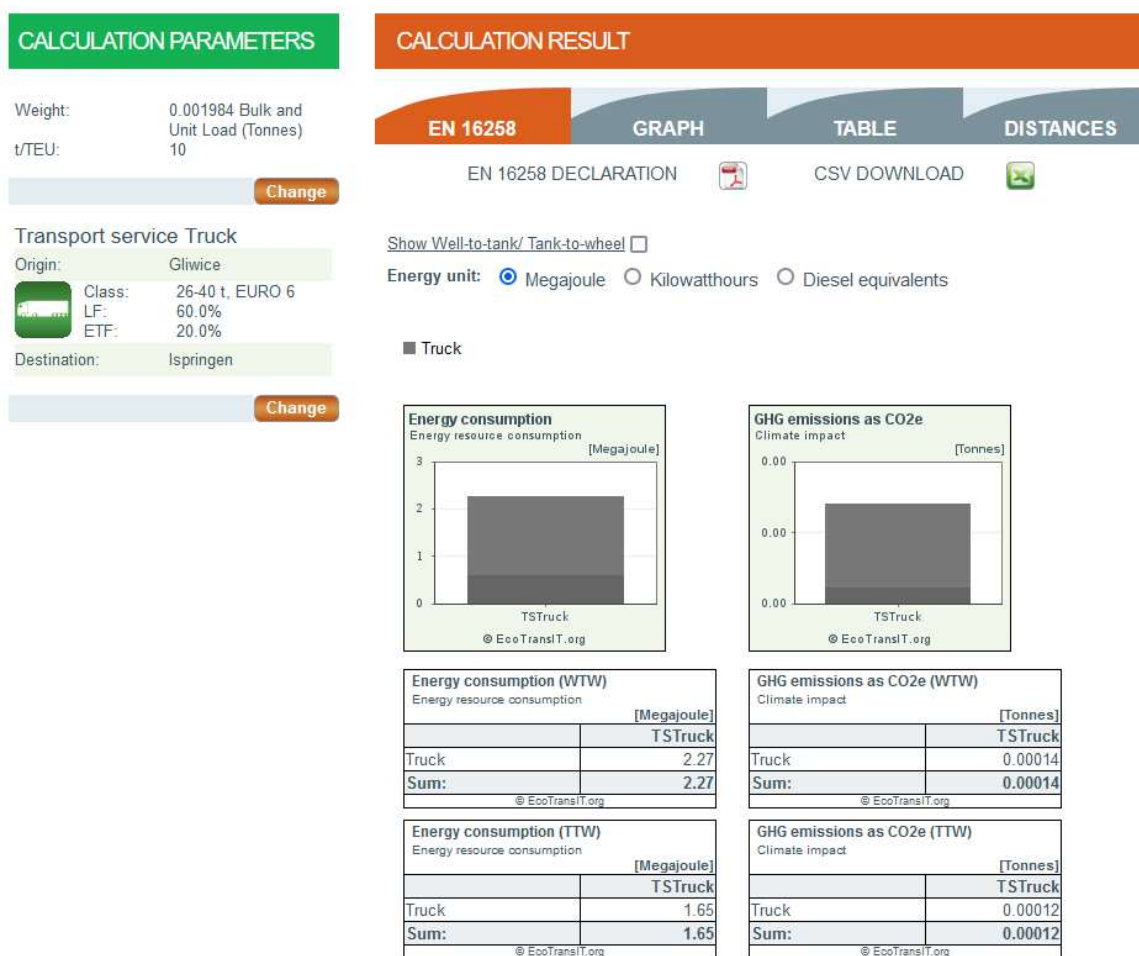
Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

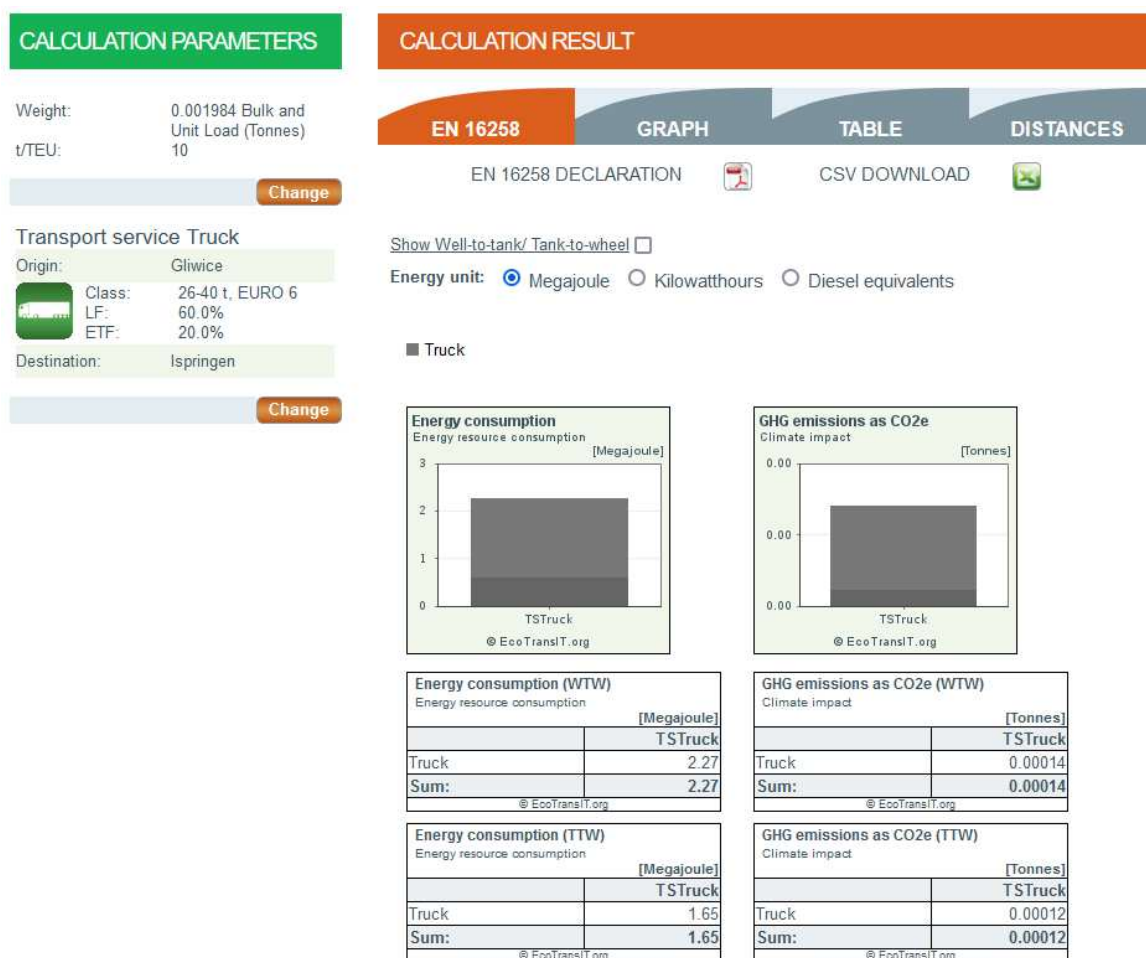
Suma Samochód Śladów = 0.01 ton CO₂ **Offset**

0.01 ton: 77 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.33. Wartość śladu węglowego związana z transportem magnezów z recyklingu do przedsiębiorstwa KOMEL (wariant 1)



Rys.34. Obliczenia wartości śladu węglowego związanego z transportem magnezów NdFeB do zakładu w Ispringen



Rys.35. Wartość śladu węglowego związana z transportem magnesów z recyklingu do przedsiębiorstwa KOMEL (wariant 2)

Droga w milach: km ▼

Wybierz pojazd: EU samochodowa baza danych ▼

2018 ▼

RENAULT ▼

[zresetuj](#) Trafic Euro6, 2016 ▼

Energy dCi 125 , M6 ▼

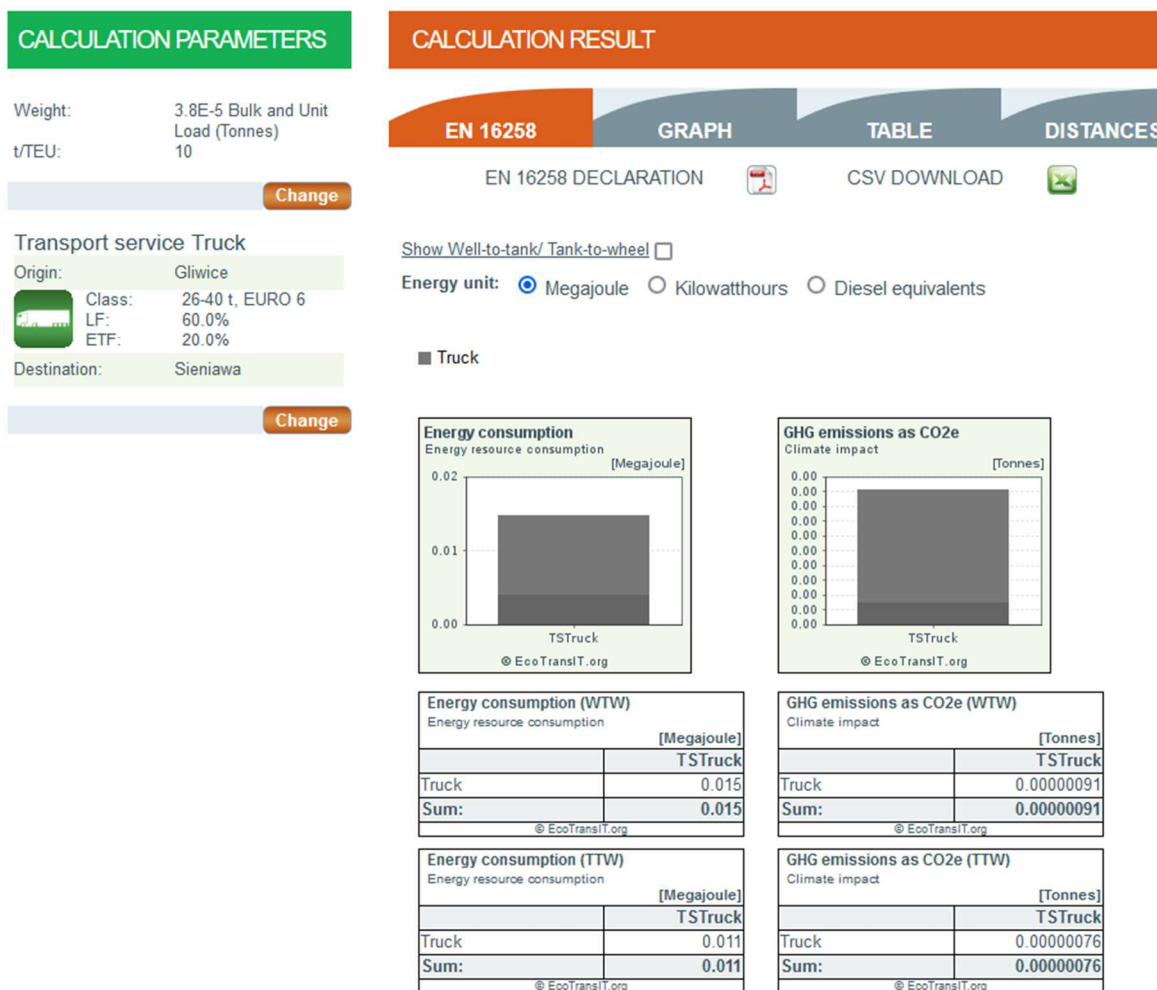
Lub wpisz wydajność: g/km ▼

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.00 ton CO₂
Offset

0.00 ton: 20 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.36. Wartość śladu węglowego związana z transportem elementów gumowych do skupu



Rys.37. Wartość śladu węglowego dla transportu produktów gumowych do sklepu produkcyjnego

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.10 ton CO₂

Offset

0.10 ton: 582 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.38. Wartość śladu węglowego związanego z transportem produktów gumowych do przedsiębiorstwa KOMEL

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

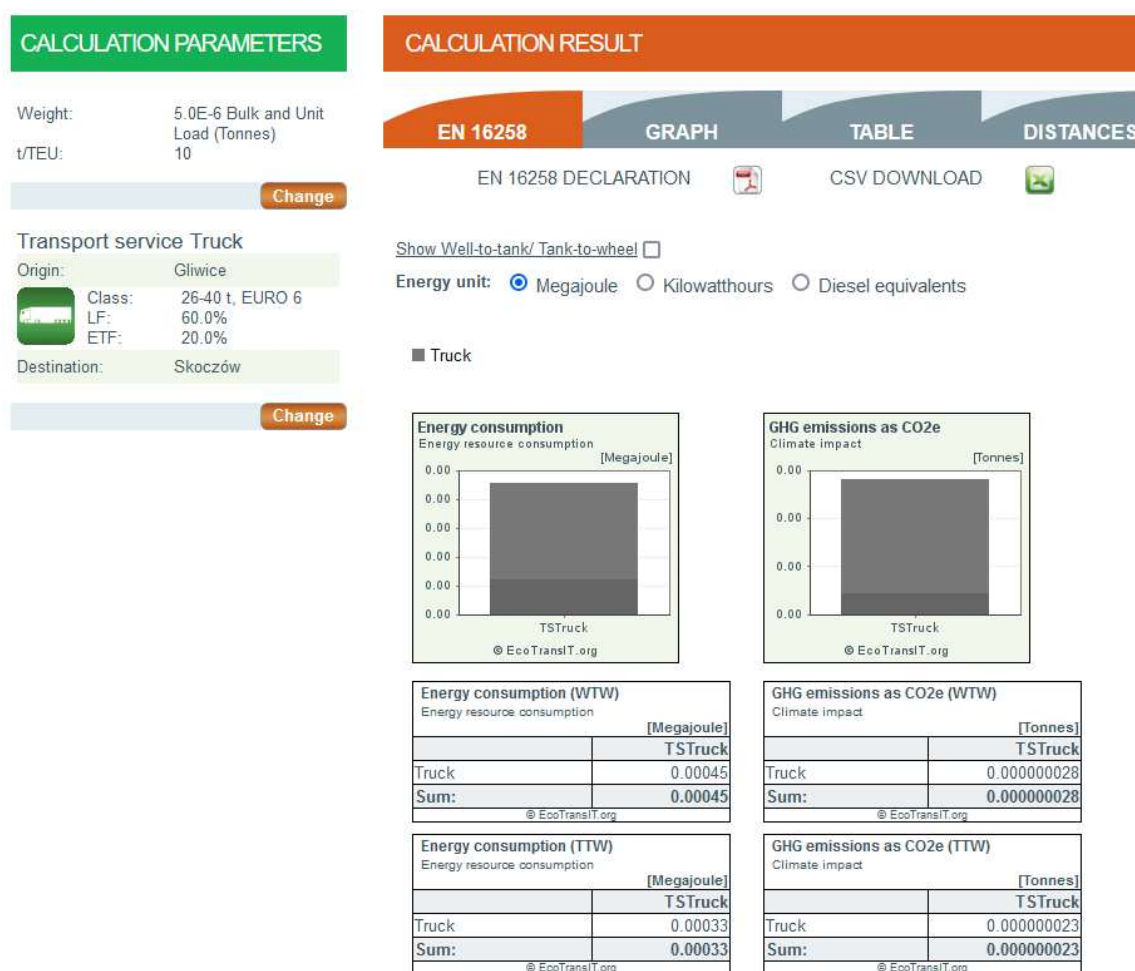
Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.00 ton CO₂

0.00 ton: 20 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.39. Wartość śladu węglowego związana z transportem kleju do skupu



Rys.40. Wartość śladu węglowego dla transportu kleju do zakładu produkcyjnego

Droga w milach: *

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.03 ton CO₂ **Offset**

0.03 ton: 160 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.41. Wartość śladu węglowego związana z transportem kleju do przedsiębiorstwa KOMEL

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

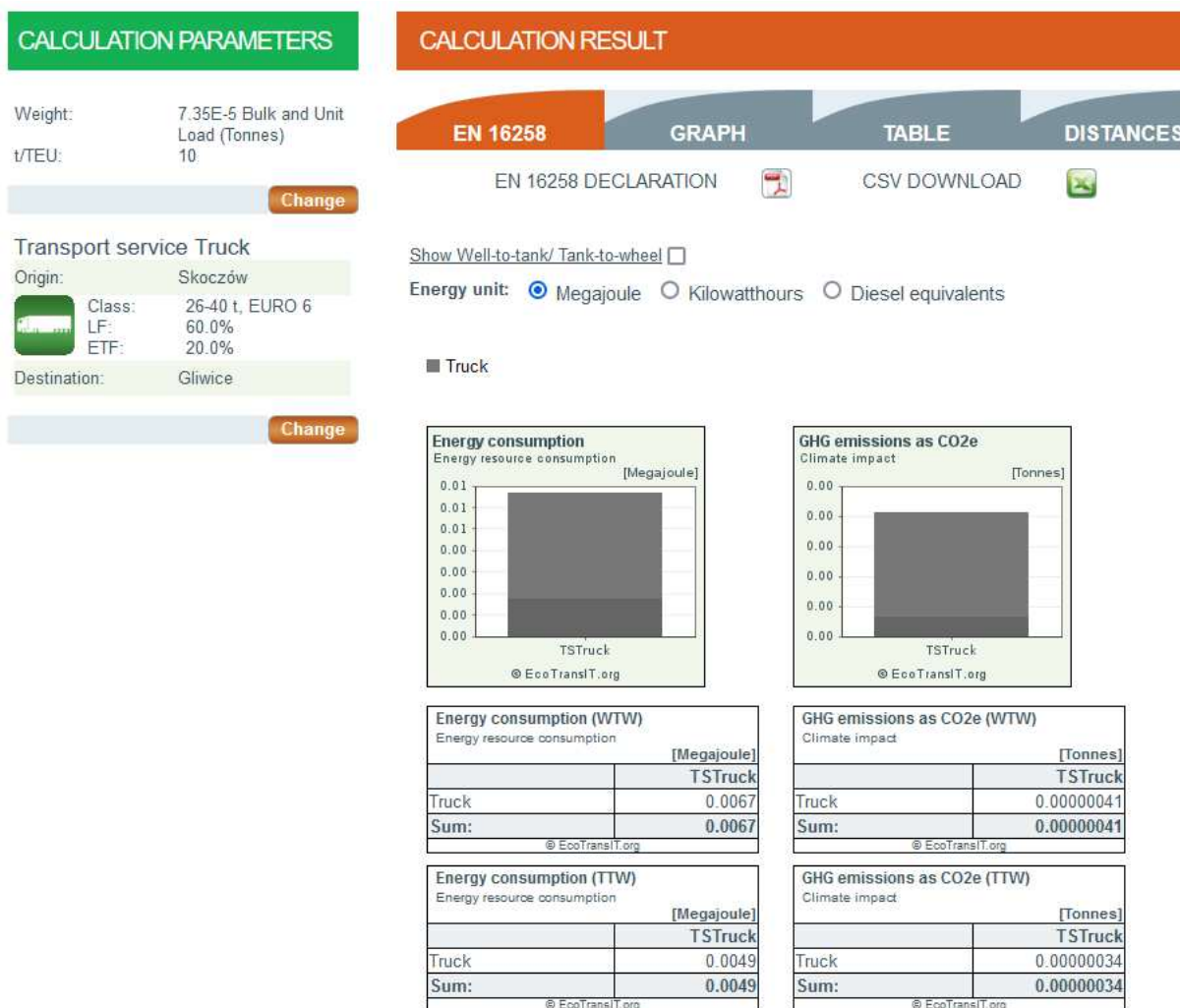
Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

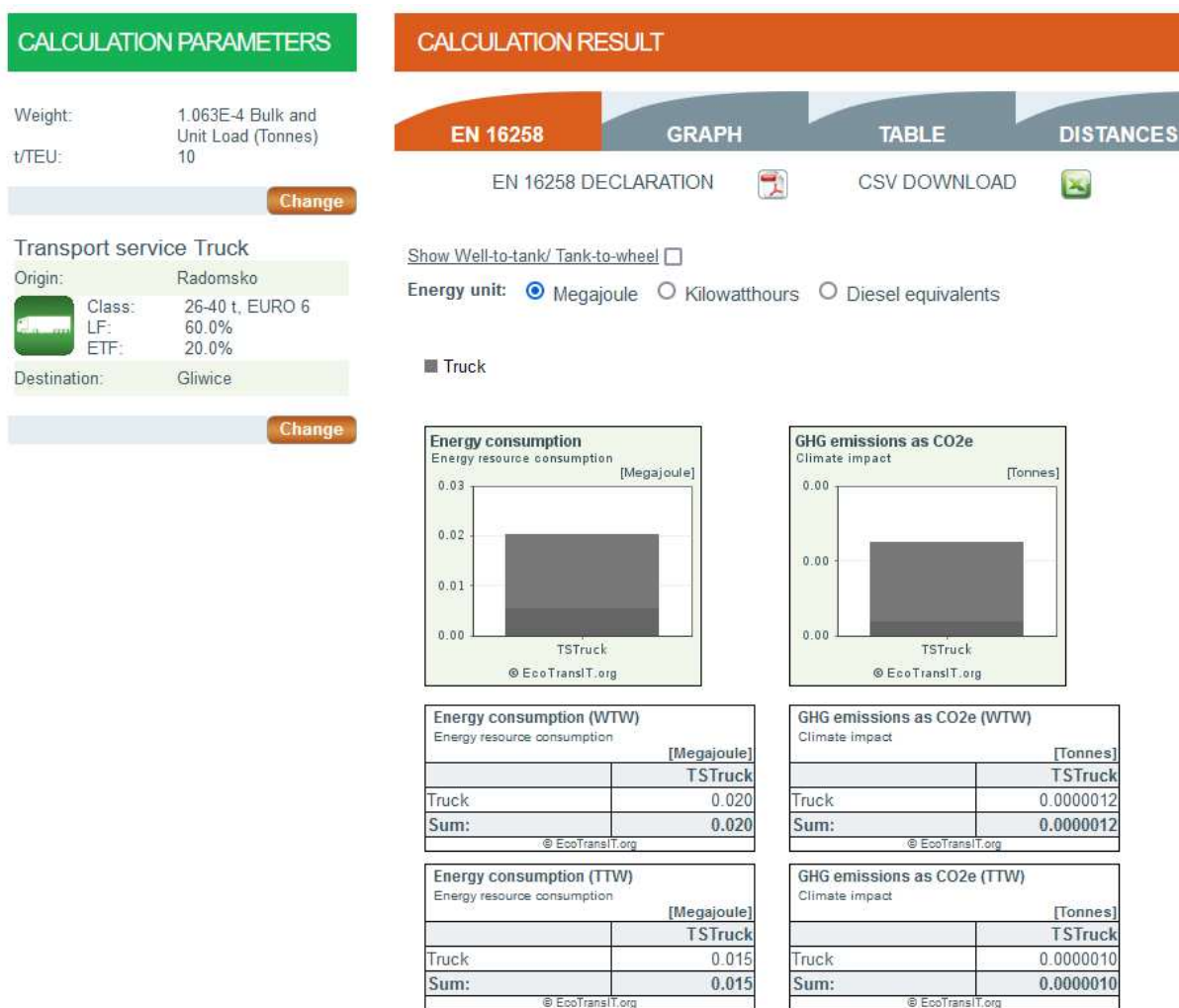
Suma Samochód Śladów = 0.00 ton CO₂ **Offset**

0.00 ton: 20 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.42. Wartość śladu węglowego związana z transportem do jednostki klasyfikującej materiał w procesie separacji elektrostatycznej



Rys.43. Wartość śladu węglowego dla transportu tworzywa sztucznego do zakładu produkcyjnego



Rys.44. Wartość śladu węglowego dla transportu miedzi do zakładu produkcyjnego

Droga w milach: km ▼ *

Wybierz pojazd:

EU samochodowa baza danych ▼

2018 ▼

RENAULT ▼

[zresetuj](#)

Trafic Euro6, 2016 ▼

Energy dCi 125 , M6 ▼

Lub wpisz wydajność: g/km ▼

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.03 ton CO₂
Offset

0.03 ton: 160 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.45. Wartość śladu węglowego związana z transportem produktów z tworzywa sztucznego do przedsiębiorstwa KOMEL

Droga w milach:

Wybierz pojazd:

[zresetuj](#)

Lub wpisz wydajność:

Oblicz i dodaj do Ekologicznego Śladu Emisji Dwutlenku Węgla

Suma Samochód Śladów = 0.04 ton CO₂ **Offset**

0.04 ton: 244 km w EU 2018 RENAULT Trafic Euro6, 2016 Energy dCi 125 , M6 [usuń](#)

Rys.46. Wartość śladu węglowego związana z transportem produktów z miedzi do przedsiębiorstwa KOMEL