



Instytut Badań Stosowanych
Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o.



Centrum Inżynierii Mineralów Antropogenicznych

OPRACOWANIE METODYKI OBLICZANIA EMISJI CO₂ PRZEZ BUDOWLE GEOTECHNICZNE

Warszawa, 2015 r.

SPIS TREŚCI

1. Założenia pracy badawczej	4
2. Wstęp	4
3. Pojęcia podstawowe	5
3.1. Ocena Cyklu Życia (LCA) – technika	5
4. Cement oraz spoiwo hydrauliczne TEFRA 25 – Analiza Cyklu Życia Produktu (LCA)	6
4.1. Cement	6
4.1.1. Zakres i cel	6
4.1.2. Proces produkcji cementu	6
4.1.2.1. Surowce	7
4.1.2.2. Produkcja mączki surowcowej	8
4.1.2.3. Wypał klinkieru	8
4.1.2.4. Przemiał cementu	9
4.1.2.5. Fazy cyklu życia	9
4.1.2.6. Informacje dodatkowe	10
4.2. TEFRA 25	11
4.2.1. Zakres i cel	11
4.2.2. Proces produkcji TEFRY 25	11
4.2.2.1. Surowce	12
4.2.2.2. Fazy cyklu życia	12
5. Metodologia a Gospodarka Obiegu Zamkniętego	15
5.1. Wprowadzenie	15
5.2. Cel i zakres	16
5.3. Wskaźniki Obiegu Zamkniętego	18

5.3.1. Dane wsadowe	19
5.3.2. Podejście scalone do wyrobu	19
5.3.3. Wyliczenie pierwotnych surowców produkcyjnych	19
5.3.4. Wyliczenie nieodzyskiwanych odpadów	19
5.3.5. Wyliczanie wskaźnika przepływu liniowego	22
5.3.6. Wyliczanie użyteczności	22
5.3.7. Wyliczanie Wskaźnika Obiegu Zamkniętego materiałów	23
5.4 Wyliczenie Wskaźników Obiegu Zamkniętego dla projektu	25
5.4.1. Wskaźniki Obiegu Zamkniętego dla cementu	25
5.4.2. Wskaźniki Obiegu Zamkniętego dla TEFRA 25	27
6. Deklaracje środowiskowe typu III	30
6.1. Kategoria wyrobu	31
6.2. Jednostka funkcjonalna	32
6.3. Dane Producenta	32
6.4. Opis zastosowania wyrobu	32
6.5. Zakres stosowania	32
6.6. Właściwości techniczno-użytkowe	33
6.7. Wyniki analizy LCA – aspekt środowiskowy	33
6.7.1. Surowce	33
6.7.2. Proces produkcyjny	34
6.7.3. Uzupełniające obliczenia wpływające na aspekt środowiskowy określone w ramach metody wskaźnikowej Obiegu Zamkniętego (CE)	34
WNIOSKI	36

1. Założenia pracy badawczej

W raporcie przedstawiona zostanie metodyka obliczania emisji CO₂ w budowlach geotechnicznych przy uwzględnieniu ich całego cyklu życia zgodnie z Polską Normą PN-EN ISO 14040 „Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Zasady i struktura.”

Pytania stawiane w projekcie:

1. Emisyjność budowli geotechnicznych w zależności od materiałów wykorzystanych na etapie stabilizacji gruntów.
2. Porównanie otrzymanych wyników
3. Wnioski w zakresie emisyjności
4. Włączenie elementów CE w kontekście aspektów środowiskowych równoległych
5. Metodyka obliczania emisyjności oraz aspektów środowiskowych

2. Wstęp

Produkcja cementu i wapna związana jest z ogromną emisją CO₂. W przypadku cementu w zależności od jego rodzaju (CEMI – CEMV) jest to poniżej jednej tony CO₂ na tonę wyprodukowanego cementu, natomiast w przypadku wapna nieznacznie powyżej 1 tony CO₂ na tonę wyprodukowanego wapna. W celu ograniczenia emisji zasadnym jest poszukiwanie spoiw alternatywnych, których produkcja nie generuje tych emisji.

Spoiwa hydrauliczne są materiałem alternatywnym w stosunku do tradycyjnie produkowanych spoiw wytworzonych na bazie cementu i wapna.

Produkcja spoiw hydraulicznych opiera się na wykorzystaniu popiołów wysokowapniowych z energetyki zawodowej, które zostaną poddane procesom uzdatniania i wzbogacania oraz są dostosowane do wymogów normowych. Procesy te nie powodują powstawania emisji CO₂. Wzrastające zapotrzebowanie na spoiwa może być więc częściowo uzupełniane przez materiały alternatywne.

3. Pojęcia podstawowe

3.1. Ocena Cyklu Życia (LCA) – technika, która ma na celu lepsze zrozumienie aspektów środowiskowych oraz możliwych wpływów na środowisko w okresie życia wyrobu począwszy od pozyskania surowców, przez produkcję, użytkowanie, przetwarzanie po wycofaniu z eksploatacji, recyklingu, aż do ostatecznej likwidacji.¹

Są cztery fazy badania LCA:

- a) **faza określania celu i zakresu** – faza obejmuje zakres, granice systemu oraz poziom szczegółowości LCA. Zależy od przedmiotu i zamierzonego celu wykorzystania badań,
- b) **faza analizy zbioru wejść i wyjść** – faza LCI jest zestawieniem danych wejściowych i wyjściowych dotyczących badanego systemu. Obejmuje zbieranie danych koniecznych do osiągnięcia celów danego badania,
- c) **faza oceny wpływu** – faza LCIA jest dostarczeniem dodatkowych informacji pomocnych w ocenie wyników LCI systemu wyrobu w celu lepszego zrozumienia znaczenia środowiskowego,
- d) **faza interpretacji** – faza w której wyniki LCI lub LCIA, lub wyniki ich obu są posumowane i dyskutowane, co stanowi podstawę formułowania wniosków, zaleceń i podejmowania decyzji zgodnie z określonym celem i zakresem.

W projekcie wykonano porównanie produkcji dwóch materiałów używanych jako substytutu w procesach stabilizacji gruntów w budowlach geotechnicznych.

Klasyczny materiał do stabilizacji podłoża, na którym buduje się nasyp drogowy składa się w 100% z cementu lub wapna. Na jeden kilometr bieżącej drogi potrzeba go od 280 do 4.000 ton (zależy to od jakości gruntu, na którym budowany jest nasyp).

¹ PN – EN ISO 14040

4. Cement oraz spoiwo hydrauliczne TEFRA 25 – Analiza Cyklu Życia Produktu (LCA)

Ślad węglowy jest to całkowita suma emisji gazów cieplarnianych wywołanych bezpośrednio przez produkcję cementu uwzględniając procesy: wydobycia surowców, produkcji i zużycia energii, transportu i samych procesów produkcji.

Rokiem bazowym dla analizy jest rok 2010. Ślady węglowe dla roku 2013 są niższe niż dla roku 2010, wynika to z ciągłego procesu zmniejszania śladu węglowego przez krajowy przemysł cementowy.

4.1. CEMENT

4.1.1. Zakres i cel

Cement jest materiałem mającym szereg zastosowań w budownictwie, dlatego jego właściwości środowiskowe istotne są w projektowaniu budynków zrównoważonych i powinny zostać określone.

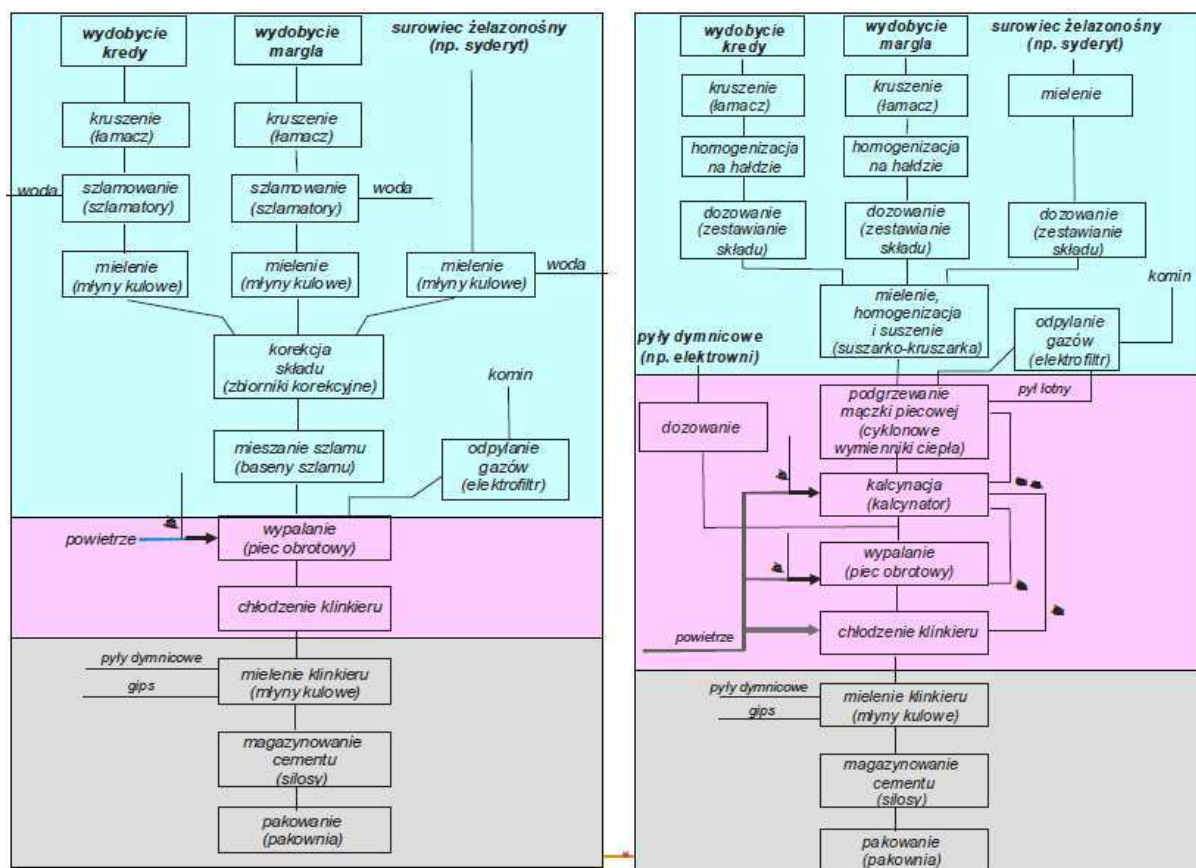
Celem niniejszej analizy jest dostarczenie wiarygodnych informacji dotyczących wpływu na środowisko jakim jest ślad węglowy (emisja ekwiwalentnego CO₂) dla cementu krajowego CEM I w fazie produkcji wyrobu w oparciu o metodykę LCA. Jednostka deklarowana czyli jednostką odniesienia jest 1 tona cementu. Analiza została przygotowana dla fazy wyrobu tj. od pobrania zasobów do bramy zakładu.

4.1.2. Proces produkcji cementu

Główne etapy procesu produkcji CEM I to:

- a) wydobycie i zakup surowców,
- b) produkcja maczki surowcowej,
- c) wypał klinkieru,
- d) przemiał cementu,
- e) składowanie cementu / dystrybucja.

Procesy te zostały przedstawione na rysunku 1.



Rysunek 1. Schemat produkcji cementu metoda sucha i mokra.

Procesy przedstawione na rysunku 1 zostały wzięte pod uwagę podczas wykonywania analizy LCA określającej ślad węglowy cementów CEM I.

4.1.2.1 Surowce

Surowcami naturalnymi używanymi do produkcji cementu są przede wszystkim materiały wapienne jak wapien lub margiel, piasek materiały glinowe takie jak glina lub łupek, które występują powszechnie określane dalej jako surowce naturalne, których ilość w wyniku ciągłej eksploatacji ulega powolnemu wyczerpaniu.

Tablica 1. Surowce użyte do produkcji CEM I w Polsce (zgodnie z PN-EN 197-1; PN-B 19707)

Cement/skład	Udział masowy
CEM I	39% - udział w ogólnej produkcji cementu w 2010 r.
Klinkier	92%
Regulator wiązania	7%
Składniki drugorzędne	1%

Roczna produkcja klinkieru dla produkcji cementu wyniosła w 2010 roku: 11500,6 tys. ton metodą suchą oraz 202,4 tys. ton metodą moką. Z uwagi na małą ilość produkcji metodą moką, do dalszych obliczeń zostaje przyjęta produkcja metodą suchą.

4.1.2.2. Produkcja mączki surowcowej

Produkcja mączki przeprowadzana jest zarówno w procesie metodą moką jak i suchą (rys.1). W metodzie suchej z reguły przygotowuje się żądaną mieszanekę w jednostopniowym procesie mielenia. Do procesu suszenia stosuje się ciepło z gazów procesowych.

4.1.2.3. Wypał klinkieru

Mączka surowcowa jest wstępnie podgrzewana z wykorzystaniem gazów surowcowych, a następnie wypalana w piecu obrotowym w temperaturze ok. 1450 stopni C. Głównymi paliwami stosowanymi w procesie są węgiel kamienny, brunatny (60,3%, tablica 2). Najistotniejsze paliwa alternatywne pochodzą z odpadów. Duża część paliw alternatywnych charakteryzuje się dużą zawartością biomasy o niskim współczynniku śladu węglowego (średnio w Polsce 0,055 MgCO₂/GJ). Zastosowanie paliw alternatywnych zmniejsza ślad węglowy cementu. Stopień zastosowania paliw alternatywnych różni się znacząco na obszarze Polski. Biorąc pod uwagę ilość ciepła produkowanego z paliw przy produkcji cementu – paliwa alternatywne to 39,4% całości energii.

Sumaryczna ilość klinkieru produkowanego w kraju w 2010 rocznie wyniosła 11702,8 tys. ton. Zgodnie z deklaracją SPC rodzaje i ilości paliw przedstawiono w tablicy 2. Kaloryczność paliw dobrano za pomocą danych literaturowych (deklaracje Producentów Cementu z Raportów Środowiskowych) i statystycznych (np. Górzyński, NETCEN).

Tablica 2. Rodzaje paliw biorące udział w procesie produkcji klinkieru w Polsce

Rodzaj paliwa na wypał klinkieru	Zużycie energii GJ	Udział w produkcji %	GJ/tonę klinkieru	Współczynnik emisji MgCO ₂ /GJ	Współczynnik emisji paliwowej MgCO ₂ /tonę klinkieru
Węgiel+petcoke	26 002 859	60,30	2,22	0,095	0,21
Oleje opałowe	63 378	0,15	0,0054	0,075	0,0004
Oleje opałowe ciężkie	62 068,8	0,14	0,0053	0,078	0,0004
Paliwa alternatywne/RDF	16 998 611	39,4	1,45	0,055	0,079
Suma	43 126 916	3,69	3,68		0,29

Ilość CO₂ wyliczonego zgodnie z MRV wynosiła w 2010 – 9 345 527,5 ton. W przeliczeniu na produkcję klinkieru to 0,798 MgCO₂/tonę klinkieru. Współczynnik emisji paliwowej przeliczony zgodnie z tabelą 2 wynosi 0,29 MgCO₂/tonę klinkieru. Współczynnik emisji procesowej wynosi 0,51 MgCO₂/tonę klinkieru.

4.1.2.4. Przemiał cementu

Klinkier jest mielony wraz z dodatkami. Zużycie energii na przemiał cementu wynosi średniostatystycznie 45,7 kWh/tonę. Całkowite zużycie energii elektrycznej w produkcji cementu wynosi 100,1 kWh/tonę. Emisyjność węglowa produkcji energii elektrycznej w Polsce wynosi 0,812 g/kWh, czyli 226 gCO₂/MJ.

4.1.2.5. Fazy cyklu życia

W analizie LCA wzięto pod uwagę następujące procesy/moduły:

A1 Wytwarzanie surowców: Wydobycie paliw, wydobycie surowców, produkcje energii elektrycznej, produkcja paliw alternatywnych.

A2 Transport: Transport surowców

A3 Produkcję wyrobu: Produkcja mączki surowcowej, zużycie paliw na wypał, zużycie energii elektrycznej na przemiał.

W tabelicy 3 przedstawiono wpływ poszczególnych elementów analizy na ślady węglowe CEM I.

Tablica 3. Elementy brane pod uwagę w analizie śladu węglowego cementów wraz z ich śladami węglowymi dla CEMI-III.

Element składowy oceny	Ślad Węglowy MgCO ₂ /Mg lub MWh	Źródło	CEM I kgCO ₂ /kg
Produkcja surowców A1	-	ITB/CEMBUREAU	0,084
Klinkier	0,798	SPC stat.	0,73
Regulator wiązania	0,002	Ecoinvent	0,00014
Popiół	0,002	ITB	0,00
Żużel	0,002	ITB	0,00
Kamień wapienny	0,028	Górzyński	0,00
Składniki drugorzędne	0,01	ITB	0,00015
Przemiał	0,812	KOBIZE	0,037
Transport A2		NFOŚ/Eurostat	0,02
SUMA			0,875

WYNIKI ANALIZ (Moduł A1-A2 zgodnie z EN 15804).

Ślad węglowy cementu CEM I produkowanego w Polsce i wyznaczonego za pomocą metody LCA i normy ISO 14067 – Carbon Footprint of Products wynosi 0,875 kgCO₂/tonę wyrobu.

4.1.2.6. Informacje dodatkowe

Produkcja cementu objęta jest krajowymi i europejskimi przepisami, które regulują efekty oddziaływania na środowisko, takie jak wydobycie surowców naturalnych, rekultywacja kopalni, odzysk energii i materiałów z odpadów, emisje hałasu pyłów i innych substancji niebezpiecznych (NOX, SO₂, metale ciężkie itd.).

Ślad węglowy dla klinkieru liczony zgodnie z wytycznymi IPCC (MRV) jest teoretycznie niższy od śladu węglowego liczonego zgodnie z ISO 14067, ponieważ uwzględnia tylko emisje paliwowe i emisje procesowe bez uwzględniania śladów węglowych surowców, ich wydobycia i transportu.

Cement CEM I uwzględniony do obliczeń w deklaracji zgodny jest z wymaganiami ze zharmonizowaną normą europejską np.: EN 197-1. Zharmonizowana norma europejska

określa istotne kryteria określone w Rozporządzeniu 305 CPR zastępującym Dyrektywę Budowlaną, w tym łącznie z wymaganiami dotyczącymi Higieny, Zdrowia i Środowiska w cyklu życia. Wykorzystanie cementu w betonie musi być również zgodne z warunkami określonymi w krajowych i/lub europejskich standardach, które również dotyczą substancji w produktach budowlanych.

Deklaracja Środowiskowa Produktu dotycząca śladu węglowego może odgrywać ważną rolę jako narzędzie komunikacji w ramach Zintegrowanej Polityki Środowiskowej KE.

4.2. TEFRA 25

4.2.1. Zakres i cel

TEFRA 25 jest materiałem mającym szereg zastosowań w budownictwie, drogowym i kolejowym. Jest spoiwem hydraulicznym, którego proces produkcji realizowany jest w instalacji odpopielenia spalin, w których gazy spalinowe są oczyszczane z popiołu lotnego, powstałego ze spalania węgla brunatnego w kotłach energetycznych oraz zbiorników retencyjnych, w których jest gromadzony wychwycony popiół. W konsekwencji otrzymujemy spoiwo hydrauliczne TEFRA 15. Po zmieszaniu go z cementem w odpowiednich proporcjach otrzymujemy spoiwo o handlowej nazwie TEFRA 25².

Celem niniejszej analizy jest dostarczenie wiarygodnych informacji dotyczących wpływu na środowisko jakim jest ślad węglowy (emisja ekwiwalentnego CO₂) dla spoiwa hydraulicznego TEFRA 25 w fazie produkcji wyrobu w oparciu o metodykę LCA. Jednostka deklarowana czyli jednostką odniesienia jest 1 tona TEFRY 25. Analiza została przygotowana dla fazy wyrobu tj. od pobrania zasobów do bramy zakładu.

4.2.2. Proces produkcji TEFRY 25

Główne etapy procesu produkcji TEFRY 25 to:

1. Zmieszanie popiołu otrzymanego bezpośrednio z elektrowni z cementem CEM I;
2. Dystrybucja.

TEFRA 25 wytwarzana jest w instalacji do produkcji materiałów drogowych położonej w Koninie (obręb Pątnów) przy ul. Kazimierskiej 45, 60-510 Konin. Znajduje się ona w bezpośrednim sąsiedztwie elektrowni, a jedynym potrzebnym do wytwarzania spoiw

² „Projekt TEFRA” 14.05.2012

hydraulicznych czynnikiem jest energia elektryczna. Dodatkowo ilość zużywanej energii elektrycznej w procesie wytwarzania spoiw na bazie popiołów wysokowapniowych jest znacznie mniejsza niż ilość energii zużywanej w procesach produkcji cementu i wapna.

4.2.2.1. Surowce

Surowcami niezbędnymi do produkcji Tefry 25 są przede wszystkim popioły lotne powstałe ze spalania węgla brunatnego w kotłach energetycznych. Produkcja ta nie wymaga stosowania surowców naturalnych. Drugim surowcem stosowanym w produkcji jest cement dodawany w ilości 20% w stosunku do masy produktu finalnego.

Tablica 4. Surowce użyte do produkcji TEFRA 25 w Polsce (zgodnie z PN-EN 13282-1; 2013)

TEFRA 25/skład	Udział masowy
Popiół lotny	80%
Cement	20%
Składniki drugorzędne	0%

4.2.2.2. Fazy cyklu życia

W analizie LCA wzięto pod uwagę następujące procesy/moduły:

A1 Wytwarzanie surowców: Wydobywanie paliw, wydobywanie surowców, produkcja energii elektrycznej, produkcja paliw alternatywnych.

A2 Transport: Transport surowców

A3 Produkcję wyrobu: Produkcja mączki surowcowej, zużycie paliw na wypał, zużycie energii elektrycznej na przemiał.

W tablicy 5 przedstawiono wpływ poszczególnych elementów analizy na ślad węglowy TEFRA 25.

Tablica 5. Elementy brane pod uwagę w analizie śladu węglowego TEFRY 25

Element składowy oceny	Źródło	TEFRA 25 kgCO ₂ /kg
Produkcja surowców A1		
Cement I (20%)	ITB	0,175
Popiół	ITB	0,00
Transport A2	NFOŚ/Eurostat	0,02
SUMA		0,195

Aby porównać emisyjność TEFRA 25 do emisyjności cementu CEM I posłużono się opracowaniem: „Dokumentacja projektowa dla projektu Wspólnych Wdrożeń realizowanego w ramach ścieżki pierwszej” Projekt TEFRA w którym określono Metodologię Linii Bazowej, która przedstawia scenariusz, który wystąpiłby gdyby spoiwa hydrauliczne zostały wytworzone tradycyjnymi metodami, opartymi na wykorzystaniu cementu i wapna i tylko takie zostały wykorzystane w budownictwie drogowym.

Aby obliczyć ilość cementu jaka zostałaby wyprodukowana, gdyby nie stosowano w budownictwie materiałów z rodziny TEFRA należy określić wskaźnik zastąpienia WS określający ilość cementu [Mg] przypadającego na 1 [Mg] wykorzystanego zamiast cementu produktu wytworzonego z popiołów wysokowapniowych. Wskaźnik zastąpienia jest jednostką bezwymiarową. Dane dotyczące wskaźnika zastąpienia cementu podane są dla poszczególnych typów spoiw oraz ich zastosowania przez producenta. Dane te zostały wyznaczone w oparciu o odpowiednie obliczenia dotyczące określenia poziomu bazowego.

Metodologia określenia WS dla TEFRA 25 zawiera następujące kroki:

1. Wskazanie dokumentu odniesienia dla rozwiązania tradycyjnego wraz z zidentyfikowaniem typowej najbardziej prawdopodobnej ilości cementu jaka byłaby użyta dla uzyskania tej części budowli drogowej, w której najczęściej stosuje się analizowany produkt alternatywny.
2. Wskazanie ilości produktu alternatywnego, jakiej najczęściej należy użyć dla uzyskania ekwiwalentnych, porównywalnych parametrów technicznych danej części budowli drogowej; podstawą są badania laboratoryjne.
3. Z porównania tych dwóch wielkości wyliczenie wskaźnika brutto i ewentualnie pomniejszenie go o rezydualną zawartość cementu w produkcie alternatywnym.

Stosując powyższą metodologię ustalono:

Wskaźnik zastąpienia cementu przez spoiwo TEFRA 25 przy stabilizacji gruntu

$WS = 1,67 \text{ [Mg]}^3$ czyli 1 cement : 1,67 TEFRA 25.

Założenia:

W funkcji stabilizacji gruntu dawka cementu podawana przez normę PN-S-96012 wynosi 4-10% przy wytrzymałości w przedziale 1,5 – 2,5 MPa; a w badaniach aprobowanych spoiwa TEFRA 25 zastosowano dawkę 7%, uzyskując wytrzymałość średnią gruntu 1,9 MPa¹. Dane wydają się wskazywać na zastępowalność 1:1, lecz biorąc pod uwagę niepewność wynikającą z mniejszej liczby dostępnych badań w porównaniu z cementem, wskaźnik ustalono w relacji 1:1,5

Parametry badania

Emisyjność cementu – 0,875 kgCO₂/ Mg

Emisyjność TEFRA 25 – 0,195 kgCO₂/ Mg

$WS = 1,67 \text{ [Mg]}$ czyli 1 cement : 1,67 TEFRA 25.

Aby określić emisyjność jednostki produktu TEFRA 25 niezbędną do uzyskania identycznego efektu technologicznego jaki uzyskalibyśmy stosując jako spoiwo hydrauliczne cement posłużymy się wyliczeniem:

$E \text{ TEFRA 25} = 0,195 \text{ kgCO}_2/\text{Mg} * 1,67 = 0,325 \text{ kgCO}_2/\text{Mg}$

Co stanowi ograniczenie emisji CO₂ 2,5 krotnie w stosunku do stosowania cementu jako spoiwa do stabilizacji gruntu.

Powyższa analiza stanowi tylko jeden element w całym łańcuchu korzyści związanej z redukcją emisji CO₂, dalsze aspekty środowiskowe prześledzimy w następnym rozdziale, poszerzając metodykę LCA o Circular Economy (CE).

³ Norma PN-S-96012. Badania na potrzeby aprobaty technicznej wykonane przez Barg Laboratorium w 2010 r.

5. Metodologia a Gospodarka Obiegu Zamkniętego

5.1. Wprowadzenie

Obecną gospodarkę można w dużym stopniu określić jako liniową: pierwotne materiały pobiera się z natury, używa ich do wytwarzania wyrobów, które następnie wykorzystuje się i na koniec się ich pozbywa. Ten model powoduje powstawanie chronicznie wysokich poziomów odpadów i stwarza zależność pomiędzy rozwojem gospodarczym a wsiadaniem nowych materiałów pierwotnych. W świecie skończonych zasobów ten model nie może działać na dłuższą metę i występują już oznaki zbliżania się do jego granic.

W przeciwieństwie do tego, gospodarka obiegu zamkniętego jest takim modelem gospodarczym i przemysłowym, który w swym zamierzeniu i kształcie zawraca materiały do obiegu. Przyjmując nową perspektywę systemową, zastępuje on ideę odpadu ideą przywracania użyteczności i zmierza w kierunku oddzielenia wzrostu gospodarczego od używania zasobów pierwotnych.

Ów model gospodarki obiegu zamkniętego rozróżnia dwa rodzaje obiegów:

- **Cykle biologiczne**, w których nietoksyczne materiały są przywracane do biosfery, gdzie odbudowują one kapitał przyrodniczy po tym, jak były kaskadowo używane w rozmaitych zastosowaniach;
- **Cykle techniczne**, w których wyroby, elementy składowe i materiały są przywracane na rynek w jakości najwyższej z możliwych i na tak długo, jak to możliwe, poprzez naprawę i konserwację, ponowne wykorzystanie, odtworzenie, ponowne wytwarzanie i na koniec recykling.

Skuteczne wdrożenie modeli obiegu zamkniętego zależy od połączonego oddziaływania czterech kluczowych bloków zagadnień:

- Przemysłenia na nowo podejścia do projektowania wyrobów sprzyjającego odzyskowi elementów składowych i materiałów;
- Innowacyjnych modeli biznesowych, umożliwiających zmianę zachęt i zbiorke (zużytych) wyrobów;

- Potrzeby wprowadzenia w życie nowej, zwrotnej logistyki odzyskiwania wyrobów od konsumentów czy użytkowników i wprowadzania ich w łańcuch dostaw oraz potrzeby poprawy metod poddawania ich zabiegom;
- Określona liczba warunków systemowych może pomóc podmiotom gospodarczym na dokonanie przejścia, takich jak edukacja, ramy polityk sektorowych, platformy współpracy czy metryki wyrobów.

Przedsiębiorstwa w narastającym stopniu dostrzegają szansę w pójściu za modelem gospodarki obiegu zamkniętego. Pomaga to im uzyskiwać dodatkowe wartości ze swoich wyrobów czy materiałów, zamiast pozbywania się ich jako odpadów. Te gospodarcze sposobności są ogromne, wyrażając się na przykład oszczędnościami w wysokości 630 mld USD w przypadku złożonych dóbr o średniej żywotności w UE i 706 mld USD w przypadku szybko zużywających się dóbr konsumpcyjnych w skali globalnej. Dodatkowo, modele o większym obiegu zamkniętym pozwalają firmom na łagodzenie ryzyka płynącego ze zmienności cen i podaży materiałów.

5.2. Cel i zakres

Na poziomie wyrobu metodologia nakierowana jest w szczególności na następujące możliwe przypadki zastosowania:

- wskaźnikami można posłużyć się przy projektowaniu nowych wyrobów aby wziąć pod uwagę obieg zamknięty jako kryterium i wkład w decyzje projektowe. Owe wskaźniki pozwalają na porównanie różnych wersji (scenariusze co by było jeśli) danego wyrobu w odniesieniu do możliwości uzyskania obiegu zamkniętego na etapie projektowania. Można ich również użyć do wyznaczenia projektantom wyrobów minimalnego osiągnięcia obiegu zamkniętego. Może się stosować zarówno do nowych wyrobów, jak i do rozwoju istniejących wyrobów, pod kątem uczynienia ich w większym stopniu podatnymi na obieg zamknięty. Aspekty projektowania wyrobu, mogące wpływać na jego wskaźniki osiągania obiegu zamkniętego rozciągają się od wyrobów materiałowych, aż po nowe modele biznesowe dla wyrobów.

Na poziomie firmy metodologia opiera się na wskaźnikach wypracowanych na poziomie wyrobu nakierowana jest w szczególności na następujące możliwe przypadki zastosowania:

- wskaźniki mogą mieć zastosowanie wewnętrzne, celem porównania stopnia obiegu zamkniętego osiągniętego przez rodziny wyrobów i działów. Pozwalają one również na śledzenie postępu w tym względzie na poziomie rodzin i wyrobów, działów firmy, bądź jej całości,
- wskaźniki mogą być stosowane zewnętrznie przez strony trzecie celem porównania osiągniętego obiegu zamkniętego. Owe strony trzecie mogą zainteresować inwestorów zainteresowanych braniem pod uwagę zagadnienia obiegu zamkniętego w swoich decyzjach inwestycyjnych, firmy ratingowe używające obiegu zamkniętego jako jednego z kryteriów.

Wskaźnik obiegu zamkniętego materiałów **MCI** skupia się na zwracaniu przepływu strumieni materiałów na poziomie wyrobów i przedsiębiorstwa oraz opiera się na czterech następujących zasadach:

1. Używanie surowców z odzysku i recyklingu;
2. Ponowne wykorzystanie składników oraz materiałów z recyklingu po zużyciu wyrobu;
3. Dłuższe utrzymywanie wyrobów w użytkowaniu (np. wtórne wykorzystanie i redystrybucja);
4. Bardziej intensywne użytkowanie wyrobów.

MCI wskazuje następujące różnice i podobieństwa z metodologiami oceny cyklu życia wyrobu (LCA):

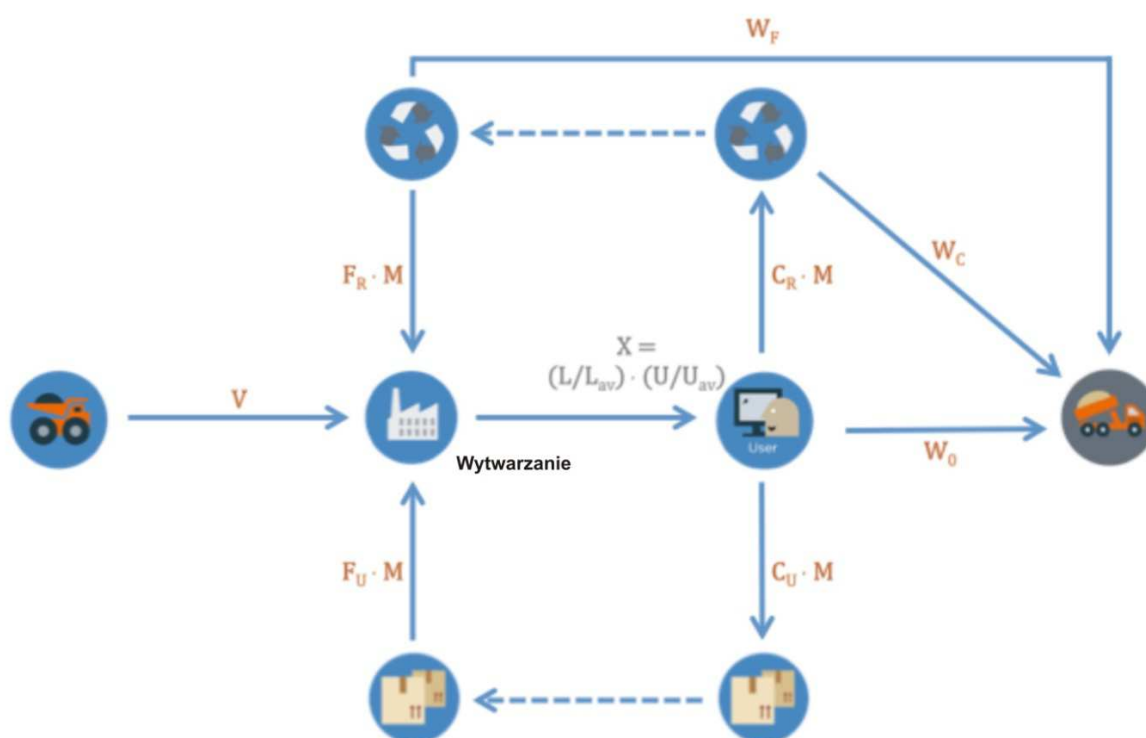
1. LCA skupia się na wywodzeniu oddziaływania na środowisko przez cały cykl życia danego wyrobu dla różnych scenariuszy, natomiast MCI skupia się na przepływach materiałów podczas całego użytkowania wyrobu. Dokładniej zachęca on do posługiwania się materiałami z recyklingu, bądź wykorzystywanymi ponownie oraz ponownego używania ich bądź poddawania recyklingowi na zakończenie użytkowania, uwzględniając przy tym podwyższoną użyteczność danego wyrobu (tj. jego trwałość i intensywność użytkowania);
2. Wiele danych wsadowych wymaganych dla LCA jest takie samo jak dla MCI i w rzeczy samej uzupełniające wskaźniki oddziaływania można wywodzić z podejścia LCA (np. stosując odpowiednie normy dla oceny śladu węglowego danego wyrobu). Dodatkowo, w przyszłości MCI mógłby być jednym z parametrów uznawanych za wynik podejścia w oparciu o LCA albo eko-projektowanie – obok parametrów już zwykle stosowanych.

5.3. Wskaźniki Obiegu Zamkniętego

Wskaźnik obiegu zamkniętego materiałów (MCI) dla danego wyrobu mierzy stopień zminimalizowania przepływu liniowego i maksymalizacji przepływu zwrotnego w odniesieniu do materiałów elementów składowych wyrobu oraz jak długo i z jaką intensywnością jest on użytkowany – w porównaniu z podobnym wyrobem, stanowiącym średnią przemysłową.

MCI zasadniczo jest skonstruowany z połączenia trzech charakterystyk wyrobu: masy V pierwotnych surowych materiałów wykorzystanych podczas produkcji, masy W nieodzyskiwanego odpadu przypisanego do danego wyrobu oraz współczynnika użyteczności X , odpowiadającego długości i intensywności użytkowania wyrobu.

Każdy wyrób wytwarzany wyłącznie z pierwotnych surowców produkcyjnych i trafiający na wysypisko po zakończeniu swojej fazy użytkowania może być uznany za wyrób całkowicie 'liniowy'. Ze strony przeciwnej, każdy wyrób nie zawierający żadnych surowców pierwotnych, który w całości podlega zbiórce do recyklingu albo powtórnego użytku składników i gdzie skuteczność recyklingu wynosi 100%, może być uważany za wyrób całkowicie przedstawiający 'obieg zamknięty'. W praktyce, większość wyrobów wypada gdzieś pomiędzy tymi skrajnościami i MCI mierzy stopień obiegu zamkniętego wartością pomiędzy 0 a 1.



Rysunek 3. Schematyczne przedstawienie strumieni materiałowych.

5.3.1. Dane wsadowe

Metodologia jest ułożona do wykorzystywania danych produktowych odpowiadających temu, co rzeczywiście ma miejsce na rynku. Dane wsadowe do modelu powinny idealnie opierać się na wiedzy dotyczącej ocenianego wyrobu. Kiedy takie informacje nie są znane, można posługiwać się zamiast tego danymi rodzajowymi dla danej gałęzi przemysłu bądź najlepszymi dostępnymi przybliżeniami.

Podczas gdy taką metodologią można posługiwać się w trybie ‘a co jeśli’ jako wskazówką przy projektowaniu wyrobu, to nie powinno się używać założeń projektowych do wyliczeń MCI dla rzeczywistego wyrobu. Na przykład wyrób może w 100% nadawać się do recyklingu, lecz w obliczeniach należy zastosować rzeczywiste wskaźniki recyklingu. Również w przypadku gdy wyrób jest zaprojektowany na dłuższą żywotność niż – z jakichkolwiek powodów – pokazuje to w praktyce doświadczenie z danym wyrobem, w obliczeniach należy użyć rzeczywistego, a nie projektowanego okresu żywotności tego wyrobu.

5.3.2. Podejście scalone do wyrobu

Wskaźnik obiegu zamkniętego materiałów buduje się wyliczając najpierw udział pierwotnych surowców produkcyjnych i nieodzyskiwanych odpadów, a potem wbudowując współczynnik użyteczności.

5.3.3. Wyliczenie pierwotnych surowców produkcyjnych

Dla wyrobu, w którym F_R stanowi frakcję surowców produkcyjnych pochodzących ze źródeł z recyklingu, zaś F_U stanowi frakcję surowców z wtórnego użytku. Frakcja pierwotnych surowców produkcyjnych wynosi wtedy $(1 - F_R - F_U)$, zaś masa materiału pierwotnego jest podana wzorem:

$$V = M (1 - F_R - F_U),$$

gdzie M jest masą wykończonego wyrobu.

5.3.4. Wyliczenie nieodzyskiwanych odpadów

Jeśli C_R przedstawia sobą ułamek masy danego wyrobu, który pod koniec jego fazy użytkowania podlega zbiórce do recyklingu a C_U jest ułamkiem masy wyrobu stanowiącym

składniki trafiające do ponownego użytku,⁴ to wtedy ilość odpadu trafiającego na wysypisko bądź do odzysku energii wynosi:

$$W_O = M (1 - C_R - C_U).$$

Jeśli E_C jest skutecznością procesu recyklingu stosowanego po zakończeniu fazy użytkowania wyrobu, to ilość odpadu wytwarzanego w procesie recyklingu podaje:

$$W_C = M (1 - E_C)C_R.$$

Odpady powstaną również podczas wytworzenia dowolnego wsadu z recyklingu używanego jako surowiec produkcyjny. To podaje

$$W_F = M \frac{(1 - E_F)F_R}{E_F},$$

gdzie E_F jest skutecznością procesu recyklingu użytego do wytworzenia surowców produkcyjnych z recyklingu.

W przeciwieństwie do równania dla W_C , równanie dla W_F ma skuteczność recyklingu E_F w mianowniku. Jest tak dlatego, gdyż ilość $M \cdot C_R$ w wyliczeniu W_C jest masą materiału trafiającego do procesu recyklingu, natomiast ilość $M \cdot F_R$ w wyliczeniu W_F jest masą materiału wychodzącego z procesu recyklingu. Dla wytworzenia ilości równej $M \cdot F_R$ materiału z recyklingu potrzeba masy $\frac{M \cdot F_R}{E_F}$ materiału trafiającego do procesu recyklingu.

Wartości E_C i E_F są właściwe dla danego materiału oraz danego procesu recyklingu i będą zależne od szeregu licznych czynników.

W pętli zamkniętej $E_C = E_F$. Jednakże niniejsza metodologia nie wymaga istnienia pętli zamkniętej, tak więc surowce produkcyjne z recyklingu mogą pochodzić ze źródeł innych niż pierwotny wyrób. Zatem E_C niekoniecznie jest równe E_F i ważne jest, aby czynić rozróżnienie pomiędzy procesem recyklingu używanym do wytwarzania surowców produkcyjnych a procesem recyklingu stosowanym wobec wyrobu po jego zbiórce.

⁴ Ponowny użytek składników odnosi się do poszczególnych składników wykorzystywanych wtórnie w jakiś funkcjonalny sposób. Ponowny użytek w tej definicji wyklucza bezpośredni ponowny użytek wyrobu jako całości, co do którego przyjmuje się, iż jest on częścią fazy użytkowania. Zakłada się również, że podczas przygotowania do ponownego użytku składników wyrobów poddanych zbiórce nie występują żadne straty materiałowe.

Przy wyliczaniu ogólnej ilości nieodzyskiwanego odpadu W , ważne jest uwzględnienie zarówno W_C , jak i W_F . Na przykład jeśli dany wyrób wykorzystuje surowiec produkcyjny z recyklingu, lecz żadna część tego wyrobu nie podlega zbiórce w celu recyklingu, to nie powstanie odpad podczas recyklingu wyrobu, lecz $W_F > 0$ (zakładając że $E_F < 1$). Podobnie, jeśli wyrób wykorzystuje 100% surowca pierwotnego, lecz podlega zbiórce w celu recyklingu, $W_F = 0$ a $W_C > 0$. Jednakże, ujmując ogólnie, gdyby po prostu dodać W_C do W_F , wtedy liczyłoby się podwójnie część bądź całość odpadu powstającego podczas dwóch procesów recyklingu.

Problem ten najłatwiej wyjaśnić rozważając przykład pętli zamkniętej, gdzie zarówno E_C , jak i E_F odnoszą się do tego samego procesu recyklingu. Rozważmy wyrób, który składa się w 50% z materiału z recyklingu ($F_R = 0,5$), podlega w całości zbiórce po fazie użytkowania ($C_R = 1$), a następnie jest wykorzystany do wytworzenia nowego wyrobu, tak że $E_C = E_F = 0,5$. Ponieważ proces recyklingu jest w tym przypadku skuteczny w 50%, to pojedynczy wyrób może z końcem swego użytkowania dostarczyć jedynie 50% surowca produkcyjnego dla nowego wyrobu. Oto dlaczego w tym przykładzie pętli zamkniętej jedynie 50% surowca produkcyjnego pochodzi z recyklingu. Posługując się powyższymi definicjami, wynikałoby teraz, że $W_C (= M \cdot 0,5 \cdot 1 = 0,5M)$ jest równe $W_F (= M \cdot 0,5 \cdot 0,5/0,5 = 0,5M)$ i uwzględnienie w całości zarówno W_C , jak i W_F , w jasny sposób liczyłoby podwójnie odpad z procesu recyklingu.

Dla uniknięcia tego problemu można by uwzględniać jedynie W_C , a pomijać W_F , lecz takie podejście nadmiernie obciąża recykling pod koniec fazy użytkowania w porównaniu z wykorzystywaniem surowców produkcyjnych pochodzących z recyklingu.

Stosuje się zatem podejście 50:50, takie że W_C i W_F uzyskują równe znaczenie, a ilość odpadu wytwarzanego przez recykling związany z danym wyrobem jest podawana jako

$$\frac{W_F + W_C}{2}$$

Takie podejście w efekcie przypisuje 50% W_F wyrobowi (wyrobom), z recyklingu których pochodzi surowiec produkcyjny, oraz 50% W_C wyrobowi, który wykorzysta materiał podlegający zbiórce i recyklingowi.

Zatem ogólną ilość nieodzyskiwanego odpadu podaje:

$$W = W_O + \frac{W_F + W_C}{2}$$

5.3.5. Wyliczanie wskaźnika przepływu liniowego

Wskaźnik przepływu liniowego (LFI) mierzy udział materiału przepływającego w sposób liniowy, to jest przychodzącego ze źródła materiałów pierwotnych i kończącego jako nieodzyskiwany odpad. Tak więc LFI wylicza się, dzieląc ilość materiału przepływającego w sposób liniowy przez sumę ilości materiału przepływającego w sposób liniowy i zwrotny (czyli w skrócie całkowity przepływ masy). Wskaźnik przyjmuje wartość z przedziału 1 i 0, gdzie 1 stanowi całkowicie liniowy przepływ, zaś 0 całkowicie zwrotny.

Wskaźnik wylicza się w sposób następujący:

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}}$$

5.3.6. Wyliczanie użyteczności

Użyteczność X ma dwa składniki: jeden odpowiadający długości fazy użytkowania danego wyrobu (żywołność) oraz drugi dotyczący intensywności użytkowania (jednostki funkcjonalne).⁵

Składnik długości użytkowania L/L_{av} odpowiada za wszelkie zmniejszenie (lub przyrost) strumienia odpadu w danym okresie czasu dla wyrobów mających dłuższą (bądź krótszą żywotność) L niż przeciętna w danej gałęzi przemysłu L_{av} . Jest to oparte na założeniu, iż zdwojenie żywotności wyrobu zmniejszy o połowę ilość wytworzonych odpadów i materiałów pierwotnych wykorzystanych w skali roku przez liniową część przepływu materiałów tego wyrobu. Podobnie, jeśli żywotność wyrobu spadnie o połowę, to wtedy ilość wytworzonych odpadów i materiałów pierwotnych wykorzystanych w skali roku przez liniową część przepływu materiałów tego wyrobu podwoi się.

Składnik intensywności użytkowania U/U_{av} odzwierciedla zakres, w jakim dany wyrób jest wykorzystywany do maksimum swoich możliwości. W tym przypadku U jest przeciętną liczbą jednostek funkcjonalnych⁶ osiągniętych podczas użytkowania danego wyrobu, natomiast U_{av} jest średnią liczbą jednostek funkcjonalnych osiąganych podczas użytkowania przeciętnego wyrobu podobnego rodzaju w danej gałęzi przemysłu. Zwiększanie intensywności użytkowania wyrobu skutkuje bardziej wydajnym wykorzystaniem wszelkich

⁵ Zwróćmy uwagę, że powinny to być rzeczywiste wartości a nie teoretyczne maksima czy wartości gwarantowane.

⁶ Jednostka funkcjonalna jest miarą użytkowania wyrobu. Może to być, na przykład jeden kilometr przejechany przez samochód bądź jeden cykl prania pralki automatycznej.

zasobów przepływających liniową ścieżką przepływu materiałów, a zatem poprawą końcowego Wskaźnika Obiegu Zamkniętego Materiałów.

Owe dwa składniki łączą się, aby utworzyć użyteczność X jako:

$$X = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) \cdot \left(\frac{U}{U_{av}}\right)$$

Zwiększanie żywotności L, kiedy średnia przemysłowa L_{av} pozostaje niezmienną, prowadzi do wzrostu X i odpowiednio do wzrostu (a zatem poprawy) wskaźnika MCI danego wyrobu.

Odwrotnie, jeśli rośnie średnia przemysłowa (np. ponieważ większość wytwórców zaczyna wytwarzać bardziej trwałe lub naprawialne wyroby), a żywotność ocenianego wyrobu pozostaje stała, to jego MCI się zmniejszy. Ponieważ oznacza to, że MCI znajduje się pod wpływem czynników leżących poza kontrolą wytwórcy, cecha ta ma tę zaletę, iż zachęca do stałego ulepszania wyrobu. Ta sama argumentacja stosuje się do jednostek funkcjonalnych.

Oczekuje się, iż w większości przypadków albo żywotność, albo jednostki funkcjonalne – ale nie obie te miary – będą używane do wyliczania X. Jeśli używa się wyłącznie żywotności, oznacza to przyjęcie założenia, że $U/U_{av} = 1$. Jeśli używa się wyłącznie jednostek funkcjonalnych, oznacza to założenie, że $L/L_{av} = 1$. Jeśli użytkownik zechce posłużyć się zarówno żywotnością, jak i jednostkami funkcjonalnymi, to ważne jest, aby upewnić się, iż wszelki skutek jest uwzględniany tylko jednokrotnie – albo jako wpływający na żywotność wyrobu, albo na intensywność użytkowania – lecz nie na obie te cechy.

5.3.7. Wyliczanie Wskaźnika Obiegu Zamkniętego Materiałów

Wskaźnik obiegu zamkniętego materiałów danego wyrobu może teraz być zdefiniowany przez uwzględnienie jego wskaźnika przepływu liniowego oraz współczynnika $F(X)$ zbudowanego jako funkcja użyteczności X, która określa wpływ użyteczności wyrobu na jego MCI. Wzór stosowany do wyliczania MCI wyrobu brzmi:

$$MCI_p^* = 1 - LFI \cdot F(X).$$

Jednakże zważywszy na definicję funkcji F , ta wartość może być ujemna dla wyrobów o głównie liniowym przepływie materiałów ($LFI \approx 1$) i użyteczności gorszej od przeciętnego wyrobu ($X < 1$). Celem uniknięcia tego, wskaźnik obiegu zamkniętego materiałów definiuje się jako

$$MCI_p = \max (0, MCI_p^*).$$

Zauważmy, że oznacza to, iż dwa ‘bardzo liniowe’ wyroby nie dadzą się właściwie porównać ze sobą przy użyciu tej metodologii (gdyż oba mogą uzyskać MCI równe 0). Jednakże ponieważ nie zakłada się, iż ta metodologia będzie normalnie stosowana do tego rodzaju wyrobów, nie powinno być żadnych problemów z tym podejściem.

Poprzez to, że współczynnik użyteczności $F(X)$ wpływa jedynie na liniową część przepływu materiałów (pamiętamy, że LFI mierzy udział materiałów przepływających w sposób liniowy), wzór powyższy jest tak ułożony, że im wyższy jest udział przepływów zwrotnych w wyrobie, tym niższy jest wpływ użyteczności wyrobu. Zatem MCI_p przyjmuje wartość 1, kiedy zarówno W , jak i V są równe 0 (tj. $LFI = 0$) – niezależnie od użyteczności. W pozostałych przypadkach F jest pomyślane jako piętnowanie wyrobów o krótkiej żywotności i kiepskiej użyteczności i na odwrót.

Funkcję F dobiera się teraz w taki sposób, iż poprawa użyteczności danego wyrobu (np. poprzez dłuższe użytkowanie go), ma taki sam wpływ na jego MCI , co powtórne użytkowanie jego składników, prowadzące do takiego samego ograniczenia zużycia materiałów pierwotnych i ilości nieodzyskiwanych odpadów w danym okresie czasu.⁷ Oznacza to, że zmniejszenie przepływu linearnego o stały współczynnik c , powinno mieć wpływ taki sam, jak zwiększenie użyteczności o współczynnik c . Biorąc wzór powyższy jako sposób wyliczenia MCI_p^* , funkcja F powinna zatem mieć postać $\frac{a}{x}$ dla jakiejś stałej a . Przyjęcie wartości $a = 0.9$ zapewnia, że MCI osiąga umownie wartość 0,1 dla wyrobu całkowicie liniowego (tj. $LFI = 1$), którego użyteczność równa się średniej w danej gałęzi przemysłu (tj. $X = 1$).

Tak więc F przybiera postać:

$$F(X) = \frac{0.9}{X}$$

⁷ Na przykład wyrób wytworzony z materiału pierwotnego i wyrzucany na wysypisko po dwóch latach użytkowania wywołuje tyle samo materiału pierwotnego i wytwarza taką samą ilość nieodzyskiwanego odpadu w okresie owych dwóch lat, co podobny wyrób użytkowany jedynie przez jeden rok, lecz wytworzony z 50% powtórnie użytkowanych składników (poza tym z materiału pierwotnego) i którego 50% składników zostaje powtórnie użyte (zaś reszta trafia na wysypisko).

Jeśli użyteczność wyrobu jest niższa od średniej w danej gałęzi przemysłu (tj. $X < 1$) obniża to wskaźnik obiegu zamkniętego materiałów. Oznacza to, że dla wyrobu o $LFI = 1$ i $X < 1$, MCI będzie mniejsze od 0,1 i szybko zbliży się do zera. Pozwala to na to, żeby MCI odróżniał wyroby całkowicie liniowe, których wartość żywotności i liczbie jednostek funkcjonalnych są takie same jak w podobnego rodzaju przeciętnym wyrobie w danej gałęzi przemysłu (tj. $X = 1$ skutkując wartością $MCI_P = 0,1$), od wyrobów całkowicie liniowych o niższej żywotności i liczbie jednostek funkcjonalnych od średniej gałęziowej (skutkując wartością $0 \leq MCI_P \leq 1$). To wyjaśnia, dlaczego MCI wyrobu całkowicie liniowego o użyteczności równej przeciętnej w danej gałęzi przemysłu przyjęto jako 0,1 zamiast 0.

5.4. Wyliczenie Wskaźników Obiegu Zamkniętego dla projektu

5.4.1. Wskaźniki Obiegu Zamkniętego dla cementu:

a) Masa materiału pierwotnego: $V = M (1 - F_R - F_U)$

M – masa wykończonego wyrobu

F_R – frakcja surowców produkcyjnych pochodzących ze źródeł z recyklingu

F_U – frakcja surowców z wtórnego użytku

W obliczeniach wychodząc z założenia że jako wsadu do produkcji cementu używamy surowców naturalnych, natomiast masa popiołów waha się w przedziale 10% – 11% przy M równym 1 jednostce produktu współczynnik materiału pierwotnego wyniesie:

$$V = 1 \text{ jednostka} (1 - 0,11 \text{ jednostki} - 0) = 0,89 \text{ jednostki}$$

b) Współczynnik nieodzyskiwanych odpadów: $W_O = M (1 - C_R - C_U)$.

M – masa wykończonego wyrobu

C_R – ułamek masy wyrobu, który pod koniec użytkowania podlega zbiórce do recyklingu

C_U – ułamek masy wyrobu stanowiącym składniki trafiające do ponownego użytku

Z recyklingu podbudów uzyskuje się kruszywo krzemianowe, w związku z czym cała masa zużytej stabilizacji jest w 100 % poddawana recyklingowi, więc:

$$C_R = C_u = 0$$

Stąd: $W_O = M = 0$ jednostek

c) Wskaźnik przepływu liniowego:

V – wskaźnik udziału pierwotnych surowców

W – wskaźnik nieodzyskiwanych odpadów

M – masa wykończonego wyrobu

W_C – ilość odpadu wytwarzanego w procesie recyklingu

W_F – ilość odpadu podczas wytworzenia dowolnego wsadu z recyklingu używanego jako surowiec produkcyjny.

Aby określić W_C posłużymy się wzorem:

$$W_C = M (1 - E_C) C_R,$$

gdzie:

E_C to skuteczność recyklingu, która dla naszego przykładu wynosi 100 %, natomiast

W_F wyliczymy ze wzoru

$$W_F = M \frac{(1 - E_F) F_R}{E_F},$$

gdzie:

E_F to skuteczność procesu recyklingu użytego do wytworzenia surowców produkcyjnych z recyklingu. W naszym przypadku dana ta przybiera wartość 100%

Wskaźnik przepływu liniowego dla naszego przykładu:

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_G}{2}}$$

Wynosi 0,45 co wskazuje na w połowie liniowy przebieg procesu.

d) Wskaźnik Obiegu Zamkniętego:

$$MCI^*_P = 1 - LFI \cdot F(X),$$

gdzie:

LFI jest wskaźnikiem przepływu liniowego,

F(X) stanowi współczynnik zbudowany jako funkcja użyteczności wyrobu.

W naszym przypadku przyjmujemy wartość równą 1 z powodu braku danych źródłowych o użyteczności stabilizacji gruntowej na bazie cementu oraz jej żywotności stąd:

$$MCI^*_P = 1 - 0,45 = 0,55$$

MCI^*_P przyjmuje wartości z przedziale $\langle 0,1 \rangle$, gdzie wartość 0 oznacza wyrób całkowicie liniowy, natomiast wartość 1 – to obieg zamknięty

5.4.2. Wskaźniki obiegu zamkniętego dla TEFRA 25:

a) Masa materiału pierwotnego: $V = M (1 - F_R - F_U)$

M – masa wykończonego wyrobu

F_R – frakcja surowców produkcyjnych pochodzących ze źródeł z recyklingu

F_U – frakcja surowców z wtórnego użytku

W obliczeniach zakładamy, że tylko 20% składu jednej jednostki wyrobu stanowi cement, dla którego w poprzednich obliczeniach ustaliliśmy F_R na poziomie 0,11 jednostki

$$V = 1 \text{ jednostka} ((1 - 0,8 \text{ jednostki} - (0,11 * 0,2)) = 0,18 \text{ jednostki}$$

b) Współczynnik nieodzyskiwanych odpadów: $W_O = M (1 - C_R - C_U)$.

M – masa wykończonego wyrobu

C_R – ułamek masy wyrobu, który pod koniec użytkowania podlega zbiórce do recyklingu

C_U – ułamek masy wyrobu stanowiącym składniki trafiające do ponownego użytku

Z recyklingu podbudów uzyskuje się kruszywo krzemianowe, w związku z czym cała masa zużytej stabilizacji jest w 100% poddawana recyklingowi, więc:

$$C_R = C_U = 0$$

Stąd: $W_O = M = 0$ jednostek

c) Wskaźnik przepływu liniowego:

V – wskaźnik udziału pierwotnych surowców

W – wskaźnik nieodzyskiwanych odpadów

M – masa wykończonego wyrobu

W_C – ilość odpadu wytwarzanego w procesie recyklingu

W_F – ilość odpadu podczas wytworzenia dowolnego wsadu z recyklingu używanego jako surowiec produkcyjny.

Aby określić W_C posłużymy się wzorem:

$$W_C = M (1 - E_C) C_R,$$

gdzie:

E_C to skuteczność recyklingu, która dla naszego przykładu wynosi 100 %, natomiast

W_F wyliczymy ze wzoru:

$$W_F = M \frac{(1-E_F)F_R}{E_F},$$

gdzie:

E_F to skuteczność procesu recyklingu użytego do wytworzenia surowców produkcyjnych z recyklingu. W naszym przypadku dana ta przybiera wartość 100%

Wskaźnik przepływu liniowego dla naszego przykładu:

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}}$$

Wynosi 0,09 co wskazuje na w 90% przepływ wyrobu w obiegu zamkniętym.

d) Wskaźnik Obiegu Zamkniętego:

$$MCI_P^* = 1 - LFI \cdot F(X),$$

gdzie:

LFI jest wskaźnikiem przepływu liniowego,

$F(X)$ stanowi współczynnik zbudowany jako funkcja użyteczności wyrobu.

W naszym przypadku przyjmujemy wartość równą 1 z powodu braku danych źródłowych o użyteczności stabilizacji gruntowej na bazie cementu oraz jej żywotności stąd:

$$MCI_P^* = 1 - 0,09 = 0,91$$

MCI_P^* przyjmuje wartości z przedziale $\langle 0,1 \rangle$, gdzie wartość 0 oznacza wyrób całkowicie liniowy, natomiast wartość 1 – to obieg zamknięty

6. Deklaracje środowiskowe typu III

Ważnym czynnikiem zapewniającym nabywcom możliwość dokonania świadomego wyboru wyrobów budowlanych jest stopień zrozumienia informacji o ich właściwościach technicznych oraz, w coraz większym stopniu, istotnych aspektach środowiskowych. Narzędziami umożliwiającymi odpowiednią komunikację cech środowiskowych wyrobów są deklaracje środowiskowe, które, zgodnie z aktualną polityką Komisji Europejskiej, należą do grupy podstawowych narzędzi wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju. Opracowanie takiej deklaracji polega na dokonaniu oceny wyrobu, poprzez określenie jego charakterystyki wyrażonej zbiorem odpowiednio dobranych wskaźników, odnoszących się do poszczególnych kategorii oddziaływania na środowisko lub cech ekologicznych.

Etykiety środowiskowe III typu, zgodnie z postanowieniami normy ISO, powinny zawierać dane ilościowe na temat oddziaływań środowiskowych produktu w ciągu całego jego cyklu życia, uzyskane na w wyniku procedur badawczych zgodnych z normami serii ISO 14040, dotyczącymi analiz LCA (LifeCycle Assessment). Taka deklaracja środowiskowa jest weryfikowana przez stronę trzecią, co zapewnia jej wiarygodność. Z uwagi na szczegółowość oraz bardziej techniczny sposób prezentowania informacji, podstawowym przeznaczeniem etykiet środowiskowych III typu jest usprawnienie komunikacji pomiędzy przedsiębiorcami na różnym szczeblu łańcucha produkcji, czyli w tzw. relacjach B2B (choć zawarte w nich dane mogą być przydatne również dla konsumentów końcowych).

Ich rola jest szczególnie istotna przy wyborze półproduktów lub komponentów do produkcji bardziej złożonych wyrobów, które mają być przyjazne dla środowiska. Wpływa na to modułowa struktura koncepcji deklaracji środowiskowych III typu, z której wynika, że całkowite oddziaływanie na środowisko wszystkich półproduktów należy uwzględnić przy wyznaczaniu takiego oddziaływania dla wyrobu końcowego.

Dla wyrobów, które samodzielnie nie posiadają określonej funkcjonalności, a jedynie mogą być używane jako półprodukty dla różnego typu bardziej złożonych wyrobów, nie jest możliwe określenie oddziaływania na środowisko w całym ich cyklu życia, ponieważ nie da się określić jakiego produktu częścią się staną, a co za tym idzie, jak będą użytkowane, demontowane itp. Deklaracja środowiskowa dla tego typu produktów obejmuje tylko tą część ich cyklu życia, która jest możliwa do określenia na podstawie wiarygodnych przesłanek.

Zgodnie z PN ISO 14025 ogólnym celem etykiet i deklaracji środowiskowych jest wspieranie popytu i podaży tych wyrobów i usług, które powodują mniejsze obciążenie dla

środowiska przez komunikowanie sprawdzalnej i nie wprowadzającej w błąd informacji o aspektach środowiskowych wyrobów i usług, stymulując ciągłą poprawę stanu środowiska poprzez działania rynkowe.

Cel deklaracji środowiskowych III typu są następujące:

1. Dostarczenie informacji opartych na LCA oraz dodatkowych informacji dotyczących aspektów środowiskowych wyrobów;
2. Pomaganie nabywcom i użytkownikom w dokonywaniu świadomych porównań między wyrobami; te deklaracje nie są stwierdzeniami porównawczymi;
3. Zachęcanie do poprawy efektywności środowiskowej;
4. Dostarczanie informacji w celu oceny wpływów na środowisko wyrobów w całym ich cyklu życia.

Przy opracowywaniu deklaracji środowiskowych III typu należy uwzględnić wszystkie istotne aspekty środowiskowe wyrobu w całym ich cyklu życia, które powinny stać się częścią deklaracji. Ekspertcy wyróżniają dwie podstawowe zasady zmniejszania obciążenia środowiska podczas cyklu istnienia wyrobu:

1. Dążenie do minimalizacji pobranych zasobów;
2. Dążenie do minimalizacji emisji zanieczyszczeń w każdej fazie cyklu istnienia przy maksymalizacji efektu użytecznego spełnianego przez wyrób.

Aby opracować deklarację środowiskową w przypadku powyższego projektu należy uwzględnić aspekt środowiskowy wszystkich możliwych oddziaływań na środowisko uwzględniający cały cykl życia produktu oraz elementy gospodarki obiegu zamkniętego.

6.1. Kategoria wyrobu

Spoiwo hydrauliczne wykorzystywane w stabilizacji gruntów o nazwie handlowej „TEFRA 25”. Spoiwo TEFRA 25 jest mineralnym spoiwem hydraulicznym złożonym głównie z wapiennych popiołów lotnych i cementu portlandzkiego CEM I.

6.2. Jednostka funkcjonalna

Jednostką funkcjonalną jest jedna jednostka spoiwa hydraulicznego, przedstawiająca jednakowy efekt technologiczny.

6.3. Dane Producenta

EKOTECH Inżynieria Popiołów Sp. z o.o. z siedzibą 03-982 Warszawa, ul. Gen. S. Skalskiego 1/U16

6.4. Opis zastosowania wyrobu

Spoivo hydrauliczne TEFRA jest przeznaczone do ulepszania i stabilizacji gruntów w budownictwie drogowym. Głównym typem gruntów dla których stosuje się spoiwo to grunty drobnoziarniste. Stosowanie spoiwa TEFRA 25 poprawia właściwości geotechniczne gruntu obejmujące: osuszanie gruntów, zmniejszenie stopnia plastyczności, poprawa zagęszczalności, zwiększenie odporności na działanie wody i mrozu oraz zwiększenie nośności. Spoiwo TEFRA 25 może być stosowane jako materiał ulepszający uziarnienie kruszyw i gruntów.

Spoivo TEFRA 25 może być stosowane do ulepszenia podłoża gruntowego przy wymaganiach wytrzymałościowych RM 1,5 lub 2,5 MPa.

6.5. Zakres stosowania

- drogi publiczne bez ograniczeń,
- drogi wewnętrzne,
- place postojowe i manewrowe,
- ścieżki rowerowe,
- umacnianie terenów budowlanych.

6.6. Właściwości techniczno-użytkowe

- materiały i surowce:

1. Cement – właściwości techniczne i wymagania dla cementu portlandzkiego CEM I według PN-EN 197-1
2. Popiół lotny – właściwości techniczne i wymagania dla popiołów lotnych wapiennych według PN-EN 14227-4

- pakowanie:

Spoiwo hydrauliczne TEFRA 25 jest dostarczana luzem

- transport i składowanie:

Spoiwo transportowane jest w cementowozach bezpośrednio na plac budowy. W przypadku konieczności przechowywania wykonuje się to w warunkach powietrzno-suchych. Okres przechowywania liczonego od dnia wysyłki nie powinien przekroczyć 60 dni.

6.7. Wyniki analizy LCA – aspekt środowiskowy

6.7.1. Surowce:

a) Cement portlandzki CEM I – zużycie surowców naturalnych niezbędnych do produkcji cementu, w przypadku stosowania spoiw hydraulicznych TEFRA 25 jest mniejsze o 60-70% w stosunku do użycia adekwatnej jednostki spoiwa hydraulicznego w postaci cementu.

Wartość ta wynika z analizy dwóch wartości:

- ilości zastosowanego cementu CEM I do produkcji TEFRA 25 – 20%
- wskaźnika zastąpienia 1,67

b) Popiół lotny – surowiec będący ubocznym produktem spalania węgla brunatnego w kotłach energetycznych. Produkt dzięki dalszemu zastosowaniu w budownictwie komunikacyjnym zapewnia odzysk odpadów w elektrowniach i wykorzystanie w pełni jego bogatego składu. Dzięki wykorzystaniu ubocznych produktów spalania następuje wysokie ograniczenie zużycia surowców naturalnych, których zasoby są coraz bardziej ograniczone w środowisku naturalnym. Zgodnie z cyklem obiegu zamkniętego stosowanie popiołu lotnego w produkcji

spoiw hydraulicznych do stabilizacji gruntu w miejsce Cementu portlandzkiego CEM I powoduje znaczące zmniejszenie wskaźnika pierwotnych surowców produkcyjnych [V]. W przypadku TEFRY 25 zmniejszenie wartości wskaźnika w stosunku do cementu portlandzkiego CEM I wynosi 80%. Świadczy to znacząco korzystnym aspekcie środowiskowym określonym w ramach ograniczenia wydobycia i przetwarzania surowców naturalnych.

6.7.2. Proces produkcyjny

Proces produkcyjny w przypadku spoiwa TEFRA 25 ograniczony jest do odbioru popiołu lotnego bezpośrednio z elektrowni. Odbiór ten nie wymaga użycia środków transportu. Następnie zostaje on mieszany z cementem według ustalonej receptury, zależnej od właściwości gruntu na którym produkt finalny ma być zastosowany.

Jedynym czynnikiem niezbędnym do wytwarzania spoiwa TEFRA 25 jest energia elektryczna, której ilość w stosunku do ilości niezbędnej dla produkcji cementu portlandzkiego CEM I jest znikoma, stąd w analizie jej wartość pominięto.

Głównym czynnikiem porównywanym w procesie produkcyjnym mającym swój aspekt środowiskowy jest ślad węglowy produkcji jednej jednostki spoiwa TEFRA 25 z jednostką cementu CEM I. Zgodnie z analizą dokonaną w części 4 wykazano, że:

- Emisyjność jednej jednostki cementu CEM I wynosi 0,875 kgCO₂/Mg wyrobu
- Emisyjność jednej jednostki TEFRY 25 wynosi 0,175 kgCO₂/Mg wyrobu.

Ograniczenie emisyjności o 80% w aspekcie środowiskowym ma kolosalne znaczenie w procesach zmian klimatycznych zachodzących obecnie na kuli ziemskiej.

6.7.3. Uzupełniające obliczenia wpływające na aspekt środowiskowy określone w ramach metody wskaźnikowej Obiegu Zamkniętego (CE)

Na podstawie analizy z rozdziału 5 możemy uwydatnić szereg dodatkowych aspektów środowiskowych pokazujących wyraźnie korzyści z zastępowania spoiw tradycyjnych, spoiwami wytworzonymi na bazie ubocznych produktów spalania.

– wskaźnik zużycia pierwotnych surowców produkcyjnych

Dla spoiwa TEFRA 25 wynosi 0,18 jednostki. Wartość wskaźnika wskazuje, że tylko 18 części jednostki obliczeniowej stanowią surowce naturalne zużyte jako wsad do produkcji, co wynika z użycia 20% cementu CEM I, jako surowca. Popiół jest surowcem powstałym jako uboczny produkt spalania i nie stanowi surowca naturalnego. Wskaźnik

zużycia pierwotnych surowców produkcyjnych dla jednostki cementu wynosi 0,89 jednostki cementu co wskazuje na całkowite uzależnienie produkcji tego rodzaju spoiwa od surowców naturalnych.

– współczynnik nieodzyskiwanych odpadów

Dla wyrobu TEFRA 25 wynosi 0 co oznacza, iż produkty wytworzone na bazie tego spoiwa są w 100 % poddawane recyklingowi. Zarówno TEFRA 25 jak i cement CEM I w budowlach geotechnicznych stanowią składniki trafiające do ponownego użytku.

– wskaźnik przepływu liniowego

Dla TEFRA 25 Wskaźnik przepływu liniowego wynosi 0,09 Wartość tego wskaźnika zamyka się w przedziale $<0,1>$, przy czym wartość zero przyjmują wyroby w obiegu zamkniętym, czyli takie które nie generują nieodzyskiwalnych odpadów. Wartość jeden wskazuje na całkowicie liniowy przepływ, czyli charakteryzujący się użyciem wyłącznie surowców naturalnych i brakiem ponownego wykorzystania wyrobu po jego zużyciu oraz wykorzystania odpadów powstających podczas jego produkcji. W porównaniu z wartością wskaźnika przepływu liniowego obliczonego w punkcie 5.4.1 dla cementu, wynoszącego 0,45 można wywnioskować, iż tylko 9% jednej jednostki TEFRA 25 stanowi przepływ liniowy, a porównaniu z 45% w przypadku cementu CEM I.

– wskaźnik obiegu zamkniętego

Jako ostatni z wskaźników zastosowany w powyższym projekcie jest tylko uściśleniem wniosków dotyczących korzyści w aspekcie środowiskowym wynikających z zastępowania spoiw tradycyjnych, spoiwami wytworzonymi na bazie ubocznych produktów spalania. Wskaźnik MCI dla TEFRA 25 wynosi 0,91, natomiast dla cementu CEM I – 0,55. W przedziale, w którym wskaźnik obiegu zamkniętego może osiągać swoje wartości $<0,1>$ wartość 1 wskazuje na obieg zamknięty. Wartość 0,91 dla TEFRY 25 zamyka listę wskazówek dając jednoznaczną odpowiedź na pytanie o aspekt środowiskowy dla spoiw hydraulicznych wytworzonych na bazie ubocznych produktów spalania.

WNIOSKI

W każdym roku w Polsce jest wytwarzane ponad 20 mln ton popiołów powstałych z procesów spalania węgla. Spełnienie wymogów norm technicznych dotyczących poszczególnych zastosowań jest jedną z wielu przesłanek do wykorzystania popiołów w budownictwie. Kolejną jest 2,5-krotne ograniczenie emisji CO₂ w wyniku zastąpienia spoiw tradycyjnych spoiwami produkowanymi na bazie ubocznych produktów spalania. O wielkości problemu dla procesu zmian klimatycznych i globalnego ocieplenia klimatu może świadczyć fakt, iż wszystkie kraje klimatycznej konwencji ONZ zgodziły się przedstawić swój wkład w ograniczanie emisji w ramach przyszłego globalnego porozumienia przed klimatyczną konferencją ONZ w Paryżu w grudniu 2015 r. W Paryżu ma zostać przyjęte globalne porozumienie klimatyczne dotyczące okresu po 2020 r. Zdaniem **Komisji Europejskiej**, ma to pomóc zrealizować zobowiązanie utrzymania globalnego ocieplenia poniżej 2 st. Celsjusza. Daje to też pozytywny sygnał dla zwiększenia międzynarodowych wysiłków na rzecz przeciwdziałania zmianom klimatu w perspektywie do 2030 r. i osiągnięcia globalnego porozumienia w tej sprawie.

Kolejnym faktem przemawiającym za zmianą polityki wykorzystania ubocznych produktów spalania w aspekcie środowiskowym jest ochrona zasobów naturalnych i racjonalnego gospodarowania nimi. Analiza wskaźników Gospodarki Obiegu Zamkniętego skłania do podjęcia dalszych działań i badań pozwalających na redukcję składowisk odpadów, zwiększenia udziału ubocznych produktów spalania w całości kruszyw.

Docelowo wszystkie uboczne produkty spalania powinny zostać zagospodarowane w gospodarce, Produkty wytworzone na ich bazie stanowią doskonałe substytuty produktów wytwarzanych metodą tradycyjną oraz zapewniają uzyskanie identycznych parametrów technologicznych i technicznych wyrobów wytworzonych na ich bazie przy znaczącej redukcji negatywnego wpływu na środowisko naturalne.