

## **Analiza wpływu na środowisko produkcji gipsu budowlanego z wykorzystaniem naturalnego gipsu i gipsu z odsiarczania spalin w polskich warunkach**

### **Analysis of the environmental impact of the production of building gypsum using natural and flue gas desulfurization gypsum in the Polish context**

**Sebastian Czernik<sup>1</sup>, Mariusz Hynowski<sup>1</sup>, Bartosz Michałowski<sup>1</sup>, Michał Piasecki<sup>2</sup>, Justyna Tomaszewska<sup>2</sup>, Jacek Michalak<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> Research and Development Center, Atlas sp. z o.o., 2, Kilińskiego St., 91–421 Lodz, Poland

<sup>2</sup> Building Research Institute (ITB), Filtrowa 1, 00-611 Warsaw, Poland

\*corresponding author: J. Michalak; e-mail: [jmichalak@atlas.com.pl](mailto:jmichalak@atlas.com.pl)

#### **Streszczenie**

Produkcja materiałów budowlanych związana jest ze zużyciem energii i surowców, w tym tych pochodzenia naturalnego. Ich wykorzystanie wiąże się z wytworzeniem znacznych ilości odpadów oraz emisją gazów cieplarnianych. Z tego względu, dla zrównoważonego rozwoju cywilizacyjnego, ważne jest ograniczenie oddziaływania na środowisko wyrobów budowlanych. Gips to jedno z podstawowych spoiw mineralnych powszechnie stosowanych w budownictwie. W pracy porównano wpływ na środowisko gipsu budowlanego wytworzonego z surowca naturalnego oraz gipsu uzyskanego w procesie odsiarczania spalin. Analizie poddano dziewięć wskaźników oddziaływania środowiskowego: potencjał globalnego ocieplenia – GWP, potencjał uszczuplenia stratosferycznej warstwy ozonowej – ODP, potencjał zakwaszenia gleby i wody – AP, potencjał eutrofizacji – EP, potencjał tworzenia ozonu troposferycznego – POCP, potencjał uszczuplenia zasobów abiotycznych w przypadku zasobów niekopalnych – ADP-pierwiastki oraz zasoby kopalne – ADP-paliwa kopalne, całkowite zużycie zasobów odnawialnej energii pierwotnej – PERT oraz całkowite zużycie zasobów nieodnawialnej energii pierwotnej – PENRT. Większe wartości wszystkich rozpatrywanych wskaźników uzyskano dla gipsu budowlanego wytworzonego z surowca pochodzącego z procesów odsiarczania spalin. Ocenę oddziaływania środowiskowego przeprowadzono wykorzystując metodę oceny cyklu życia [LCA], korzystając z rzeczywistych danych produkcyjnych z roku 2017. Cykl życia będący przedmiotem analizy niniejszej pracy obejmował moduły od A1 do A3, to jest od wydobycia/uzyskania surowców aż do gotowego wyrobu, dostarczonego do bramy fabryki.

#### **Summary**

The production of construction products is associated with energy and raw materials consumption, including those of natural origin. Their use is associated with the generation of significant quantity of waste and the emission of greenhouse gases. Therefore, for the sustainable development of civilization, it is essential to reduce the environmental impact of construction products. Gypsum is one of the primary mineral binders, commonly used in construction. The study compares the effect on the environment of building gypsum made of natural raw materials and gypsum obtained in the flue gas desulfurization process. Nine environmental impact indicators were analyzed: global warming potential – GWP, stratospheric ozone layer depletion potential – ODP, soil and water acidification potential – AP, eutrophication potential – EP, tropospheric ozone formation potential – POCP, abiotic depletion potential for non-fossil resources – ADP-elements and fossil resources-ADP-fossil fuels, total use of renewable primary energy resources – PERT and total use of non-renewable primary energy resources – PENRT. Higher values of all considered indicators were obtained for building gypsum made of raw material from flue gas desulfurization processes. The environmental impact assessment was carried out using the Life Cycle Assessment [LCA] method and actual production data from 2017. The life cycle analyzed in this paper covered modules from A1 to A3, i.e., from the extraction/acquisition of raw materials to the finished product, delivered to the factory gate.

**Keywords:** gypsum, natural gypsum, flue gas desulfurization [FGD] gypsum, mineral binders, environmental impact, environmental product declaration [EPD], life cycle assessment [LCA]

**Słowa kluczowe:** gips, gips naturalny, gips z odsiarczania spalin [FGD], spoiwa mineralne, oddziaływanie środowiskowe, deklaracja środowiskowa produktu [EPD], analiza cyklu życia [LCA]

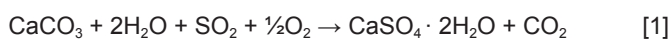
## 1. Wprowadzenie

Gips jest powszechnie stosowanym materiałem budowlanym. To spoiwo cechuje wiele zalet, a mianowicie: szybkie wiązanie i twardnienie, dobra formowalność, niska masa, ognioodporność, dobra izolacyjność akustyczna oraz nietoksyczność. Gips ma jednak słabą odporność na działanie wody. Najstarsze ślady zastosowania gipsu naturalnego jako tynku i podłoża pod freski zostały odkryte w Anatolii (1). Chińczycy, Asyryjczycy i Grecy w starożytności wykorzystywali gips do prac artystycznych, zaś Egipcjanie przy budowie piramid. W Polsce udokumentowane początki stosowania gipsu w budownictwie wiążą się kolegiatą w Wiślicy (2). Z perspektywy krajowego budownictwa warto także odnotować wykorzystanie gipsu naturalnego w okresie międzywojennym i latach sześćdziesiątych XX wieku (3).

Współcześnie gips wykorzystywany w budownictwie pozyskuje się z dwóch źródeł: złóż naturalnych oraz procesów odsiarczania spalin metodą mokrą wapienną w elektrowniach wykorzystujących głównie węgiel kamienny lub brunatny, a także ropę i jej pochodne oraz gaz. Gips powstający w procesach odsiarczania spalin nazywany jest także gipsem syntetycznym, desulfogipsem lub REA gipsem, w języku angielskim określany terminem: flue gas desulfurization [FGD] gypsum.

W naturze siarczan wapnia występuje w wielu krajach na różnych kontynentach, przede wszystkim, w dwóch formach: gipsu dwuwodnego [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ] i anhydrytu [ $\text{CaSO}_4$ ]. Polska dysponuje dużymi zasobami gipsu i anhydrytu wynoszącymi około 261 milionów ton. Spośród 15 udokumentowanych złóż gipsu i anhydrytu w Polsce możliwa jest obecnie eksploatacja pięciu: Borków-Chwałowice, Leszcze, Lubichów, Nowy Łąd i Nowy Łąd – Radłówka (4). Obecnie wydobywanie anhydrytu ze złoża Lubichów jest czasowo zawieszono.

Gips z odsiarczania spalin [FGD] jest jednym z ubocznych produktów spalania [UPS], powstającym w instalacjach odsiarczania spalin metodą mokrą wapienną w elektrowniach konwencjonalnych. Kilkuetapową reakcję w następstwie, której powstaje gips syntetyczny schematycznie można zapisać poniższym równaniem:



Zależnie od rodzaju zastosowanego paliwa oraz stopnia zawartości siarki w kopalinie, otrzymuje się gips w kolorze od szaro-żółtego do szarawo-białego. Gips powstały w procesach odsiarczania spalin wyróżnia się wyższą zawartością siarczanu wapnia niż gips naturalny, który z uwagi na powstawanie w wyniku procesów geologicznych, zawiera różnego rodzaju zanieczyszczenia mineralne.

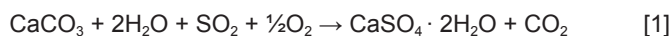
## 1. Introduction

Gypsum is a commonly used building material. This binder has many advantages: fast setting and hardening, good formability, low mass, fire resistance, good sound insulation, and non-toxicity. However, gypsum has low water resistance. The oldest traces of the use of natural gypsum as plaster and the substrate for frescoes were discovered in Anatolia (1). Chinese, Assyrians, and Greeks used plaster in ancient times for artistic works, while the Egyptians used to build pyramids. In Poland, the documented beginnings of using gypsum in construction are related to the collegiate church in Wiślica (2). From the domestic construction industry perspective, it is also worth noting the use of natural gypsum in the interwar period and the 1960s (3).

Nowadays, gypsum used in construction is obtained from two sources: natural deposits and flue gas desulfurization processes using the wet lime method in power plants and using mainly hard coal or lignite and oil and its derivatives as well as gas. The gypsum produced in the flue gas desulfurization processes is also called synthetic gypsum, desulfogypsum, or REA-gypsum. In English, it is referred to as flue gas desulfurization [FGD] gypsum.

In nature, calcium sulfate occurs in many countries on different continents, mainly in two forms: dihydrate gypsum [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ] and anhydrite [ $\text{CaSO}_4$ ]. Poland has extensive resources of gypsum and anhydrite, amounting to approximately 261 million tonnes. Out of 15 documented deposits of gypsum and anhydrite in Poland, five are currently operational: Borków-Chwałowice, Leszcze, Lubichów, Nowy Łąd and Nowy Łąd - Radłówka (4). At present, the excavation of anhydrite from the Lubichów deposit is temporarily suspended.

Flue gas desulfurization [FGD] gypsum is one of the by-products of combustion in the wet lime process, in conventional power plants. The multistage reaction, which results in the formation of synthetic gypsum, can be schematically represented by the following equation:



A gray-yellow to grayish-white gypsum is obtained depending on the type of fuel used and the degree of sulfur content in the mineral. The gypsum produced in the flue gas desulfurization processes has the higher content of calcium sulfate than natural gypsum, which, due to the formation of geological processes, contains various types of mineral impurities.

Before 1994, the Polish construction industry used almost exclusively natural gypsum. The year 1994 was the beginning of a new era in the development of construction using gypsum in Poland, when the first installation in the country was put into operation

Przed rokiem 1994 w polskim budownictwie stosowany był prawie wyłącznie gips pochodzenia naturalnego. Rok 1994 był w Polsce początkiem nowej ery w zakresie rozwoju budownictwa z wykorzystaniem gipsu, gdy oddano do użytku pierwszą w kraju instalację do odsiarczania spalin w elektrowni Bełchatów (4). W początkowym okresie gips z odsiarczania spalin był wykorzystywany w niewielkim stopniu i jak każdy odpad nie był przydatny. Na skutek wielu działań z odpadu stał się bardzo poszukiwanym surowcem. W 2020 roku w Polsce powstało 2,926 mln ton gipsu syntetycznego, zaś rok wcześniej 3,018 mln ton (5).

Na tle innych krajów europejskich Polska jest liderem w produkcji energii elektrycznej z węgla kamiennego i brunatnego. W 2019 roku udział ten wynosił około 80%, przy średniej dla wszystkich państw Unii Europejskiej na poziomie 17,4% (6). Przewiduje się, że w kraju w 2030 rok udział produkcji energii elektrycznej z elektrowni konwencjonalnych wyniesie od 56 do 60%, zaś w kolejnych latach utrzyma się tendencja spadkowa (7). W związku z koniecznością drastycznej redukcji emisji gazów cieplarnianych przed jakim stoi nasza cywilizacja, której wyrazem w Unii Europejskiej jest przyjęcie przez Komisję Europejską strategii Europejskiego Zielonego Ładu, do roku 2050 powinno nastąpić całkowite wyeliminowanie produkcji energii z paliw kopalnych na rzecz odnawialnych źródeł energii (8). W Polsce zamknięcie ostatniej kopalni węgla kamiennego zaplanowano na rok 2049 (9). Zmniejszanie się udziału energetyki konwencjonalnej w produkcji energii elektrycznej, a co za tym idzie zmniejszająca się rokrocznie ilość ubocznych produktów spalania [popioły lotne oraz produkty z odsiarczania spalin] jest notowane w UE od lat. W 2004 roku produkcja UPS w Europie wyniosła 64 miliony ton, zaś w 2016 roku już tylko 40,3 mln ton, w tym 9,9 mln ton gipsu syntetycznego (10). Aktualnie Polska jest największym producentem UPS w UE i choć dzisiaj udział eksportu UPS jest niewielki, to zapewne będzie rósł gdyż Polska postrzegana jest jako jego potencjalny dostawca (5). Biorąc pod uwagę, że już teraz brakuje na polskim rynku gipsu syntetycznego do produkcji materiałów budowlanych z każdym rokiem sytuacja będzie się w tym zakresie pogarszać (11). W związku z planowaną realizacją celów unijnych zmierzających do odejścia od produkcji energii opartej na węglu nastąpi docelowo zanik produkcji gipsu syntetycznego uzyskiwanego w procesie odsiarczania spalin, zaś branża budowlana będzie zmuszona do wypracowania alternatywnych rozwiązań – powrotu do wykorzystywania jedynie gipsu naturalnego lub stworzenia materiałów budowlanych z innych spoiw niż gips. Inną od unijnej perspektywą, w zakresie przyszłej dostępności gipsu syntetycznego, jest w Chinach, gdzie obecnie uważa się, że gips z odsiarczania spalin całkowicie zastąpi gips naturalny w budownictwie (12). Poza Europą ciągle traktuje się gips z odsiarczania spalin jako materiał odpadowy, dla którego poszukuje się nowych zastosowań (13).

Polski rynek gipsowych materiałów budowlanych niezwykle rozwinął się po transformacji systemowej 1989 roku. W 2000 roku krajowa produkcja spoiw gipsowych wyniosła 445 tys. ton, zaś w 2020 roku 1,506 mln ton (5). W budownictwie gips [dwuwodny siarczan wapnia] używany jest jako regulator czasu wiązania cementów powszechnego użytku, zaś półwodny siarczan wapnia odmiany

for flue gas desulfurization, in the Bełchatów power plant (4). In the initial period, FGD gypsum was used to a small extent, and, like any waste material, it was not valuable. As a result of many activities, waste has become a very sought-after raw material. In 2020, 2.926 million tonnes of synthetic gypsum were produced in Poland, and a year earlier, 3.018 million tonnes (5).

Compared to other European countries, Poland is a leader in producing electricity from hard and lignite coal. In 2019, this share was less than 80%, with the average for all European Union countries at 17.4% (6). It is expected that in 2030 the percentage of electricity production from conventional power plants in the country will amount from 56% to 60%. In the following years, the downward trend will continue (7). Due to the necessity to drastically reduce greenhouse gas emissions by 2050, there should be a complete elimination of energy production based on fossil fuels, in favor of renewable energy sources due to the adoption of the European Green Deal strategy in the European Union (8). In Poland, the last hard coal mine is scheduled to be closed in 2049 (9). The decrease of conventional energy share in the production of electricity and the annual reduction in the mass of fuel combustion products has been observed in the EU for years. In 2004, coproducts of combustion: fly ash and products from flue gas desulfurization, in Europe amounted to 64 million tonnes. In 2016, it was only 40.3 million tonnes, including 9.9 million tonnes of FGD gypsum (10). Currently, Poland is the largest producer of fuel combustion coproducts in the EU. Although today's share of fuel combustion coproducts exports is low, it will probably grow as Poland is perceived as its potential supplier (5). Considering that already missing on the Polish market of synthetic gypsum for building materials production, it will be worse in this respect every year (11). In connection with the planned implementation of EU goals aimed at abandoning coal-based energy production, synthetic gypsum production obtained in the flue gas desulfurization process will eventually disappear. The construction industry will be forced to work out alternative solutions - to return to using only natural gypsum or create building materials as binders other than gypsum. Unlike the EU perspective in terms of future availability of synthetic gypsum in China, it is now believed that FGD gypsum will completely replace natural gypsum in construction (12). Outside Europe, gypsum from flue gas desulfurization is still treated as a waste material, for which new applications are sought (13).

The Polish market of gypsum-based building materials developed remarkably after the system transformation in 1989. In 2000, the domestic production of gypsum binders amounted to 445 thousand tonnes, and in 2020 1.506 million tonnes (5). In construction, raw gypsum [calcium sulfate dihydrate] is used as a setting time regulator of common cement. In contrast, hemihydrate type beta gypsum is used to produce gypsum binders, gypsum plasters, gypsum boards and prefabricated elements. The physical and chemical properties of natural gypsum and FGD gypsum are similar, and there are no significant differences between them. Requirements for performance concerning the essential properties of gypsum binders, both for direct use on-site and for further processing, are specified in the European standard EN 13279-1: 2008 (14).

beta wykorzystywany jest do produkcji spoiw gipsowych, tynków gipsowych, płyt gipsowo kartonowych oraz elementów prefabrykowanych. Właściwości fizyczne i chemiczne gipsu naturalnego i gipsu z odsiarczania spalin są zbliżone, nie ma istotnych różnic pomiędzy nimi. Wymagania w zakresie właściwości użytkowych w odniesieniu do zasadniczych właściwości spoiw gipsowych zarówno do bezpośredniego stosowania na budowie, jak i dalszego przetwarzania precyzuje norma europejska EN 13279-1:2008 (14).

Gips, podobnie jak każdy wyrób budowlany w UE, podlega ocenie i weryfikacji stałości właściwości użytkowych [AVCP] zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 (CPR) (15). Producent poddaje spoiwo gipsowe ocenie AVCP zgodnie z wymaganiami EN 13279-1:2008 i sporządza deklarację właściwości użytkowych oraz umieszcza oznakowanie CE na wyrobie. Przedmiotem AVCP spoiw gipsowych, podobnie jak i wszystkich wyrobów budowlanych, nie jest ocena w zakresie siódmego wymagania podstawowego w budownictwie, tj. zrównoważonego rozwoju. Pomimo tego, że CPR jest dokumentem regulującym zasady funkcjonowania europejskiego rynku materiałów budowlanych od 1 lipca 2013 roku, do tej pory nie zostały ustalone wymagania w zakresie zrównoważonego rozwoju. Od 2012 roku producent wyrobu budowlanego może poddać dobrowolnej ocenie środowiskowej swój produkt zgodnie z EN 15804:2012 (16). Wyniki tej oceny prowadzonej z wykorzystaniem analizy cyklu życia [LCA] jest deklaracja środowiskowa III typu [EPD]. Dokument ten w swoim założeniu ma dostarczyć wiarygodnych, jednoznacznie skwantyfikowanych wartości oddziaływania środowiskowego, aby umożliwić łatwe porównanie z danymi zawartymi w innych deklaracjach (17). Pomimo tego, że operatorzy programów EPD działają według zbliżonych zasad, ogólnie dostępne dokumenty EPD różnią się pomiędzy sobą, a zawarte w nich informacje mogą prowadzić do błędnych interpretacji (18, 19). Deklaracje środowiskowe III typu, zgodnie z polityką Komisji Europejskiej, są ważnym narzędziem wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju. Z powodu ich dobrowolności nie są jednak powszechne i dotychczas mają dość ograniczone zastosowanie. Producenci materiałów budowlanych wykorzystują dane na temat oddziaływania środowiskowego wyrobów zawarte w EPD w komunikacji business-to-business [B2B], w celach marketingowych oraz przygotowując oferty do przetargów (20).

W transformacji gospodarczej mającej na celu ograniczenie zmian klimatycznych ważne jest zarówno wydłużenie cyklu życia produktów, jak i zmiana sposobu zagospodarowania produktów w ostatniej fazie ich życia. Budownictwo w transformacji do gospodarki o obiegu zamkniętym ma szczególną rolę do odegrania. W polskich warunkach jego udział w PKB wynosi 7% (21). Gospodarka o obiegu zamkniętym zmniejsza presję na zasoby naturalne i stanowi warunek wstępny osiągnięcia celu neutralności klimatycznej do 2050 roku (22). Jedną z barier zrównoważonego rozwoju jest niski poziom świadomości powiązań między gospodarką a społeczeństwem (23). Przeprowadzone w 2020 roku badania rozumienia zagadnień zrównoważonego rozwoju wśród profesjonalistów – inwestorów, architektów, wykonawców i sprze-

Like every construction product in the EU, gypsum is subject to assessment and verification of constancy of performance [AVCP] following the Construction Products Regulation [CPR] (15). The manufacturer performs the AVCP of gypsum binder under the requirements of EN 13279-1:2008 and draws up a declaration of performance, and affixes the CE marking to the product. The subject of AVCP of gypsum binders, like all construction products, is not assessing the seventh basic requirement in construction, i.e., sustainable development. Although the CPR is a document regulating the principles of the European construction materials market as of July 1, 2013, no sustainability requirements have been established. From 2012, a manufacturer of a construction product may voluntarily submit its products to an environmental assessment following EN 15804:2012 (16). The result of this Life Cycle Assessment [LCA] is a Type III Environmental Declaration [EPD]. The assumption of this document is to provide reliable, unambiguously quantified values of the environmental impact, to allow easy comparison with data contained in other declarations (17). Despite this, that operators of EPD programs dealing according to similar principles, publicly available EPD documents differ from each other, and the information contained therein may lead to misinterpretations (18, 19). In line with the European Commission's policy, Type III environmental declarations are an essential tool for implementing the principles of sustainable development. However, due to their voluntary nature, they are not common, and so far, their use is quite limited. Manufacturers of building materials use the data on the environmental impact of products in the EPD in business-to-business communication [B2B] for the marketing purposes and preparing offers for tenders (20).

In the economic transformation necessary for climate change mitigation, it is essential to extend the life cycle of products and change the way of managing products, in the last phase of their life. Construction in transition to a circular economy has a crucial role to play. In Polish conditions, its share in GDP is 7% (21). A circular economy reduces pressure on natural resources and is a prerequisite for achieving the 2050 climate neutrality goal (22). One of the barriers to sustainable development is the low level of awareness of the links between the economy and society (23). The research on the understanding of sustainable development issues carried out in 2020 among professionals - investors, architects, contractors, and sellers of construction products, identified the level of awareness in each of the surveyed groups and showed the need for further education in this field (24).

The scientific literature on the environmental impact of products is extensive, but the number of publications directly related to building materials is limited (25, 26). Publications on the environmental impact of building materials should be treated as an innovation in construction (27). The appropriate level of knowledge and awareness of issues related to the sustainable development of construction products is necessary to limit their negative impact on the natural environment. Therefore, the success of this goal must publish the results of research on the environmental impact of construction products obtained based on actual production data, in prestigious international journals (28).

dawców materiałów budowlanych rozpoznały poziom świadomości w każdej z badanych grup, jak również pokazały potrzebę dalszej edukacji w tym zakresie (24).

Literatura naukowa dotycząca oddziaływania środowiskowego produktów jest obszerna, niemniej jednak ilość publikacji odnoszących się bezpośrednio do materiałów budowlanych jest ograniczona (25, 26). Publikacje na temat wpływu na środowisko materiałów budowlanych należy traktować jako innowację w budownictwie (27). Właściwy poziom wiedzy i świadomości w zakresie zagadnień związanych ze zrównoważonym rozwojem wyrobów budowlanych jest konieczny aby ograniczyć ich negatywny wpływ na środowisko naturalne. Z tego względu kluczowe dla powodzenia tego celu jest publikowanie wyników badań dotyczących wpływu środowiskowego wyrobów budowlanych, uzyskanych na podstawie rzeczywistych danych produkcyjnych w prestiżowych czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym (28).

Ocena oddziaływania środowiskowego wyrobów budowlanych to w przypadku producentów także proces ciągłego doskonalenia własnych procesów produkcyjnych i zakupowych (29). Przeprowadzenie oceny wpływu na środowisko na podstawie danych produkcyjnych pochodzących z rzeczywistych warunków przemysłowych, to podstawa aby ocenę tę uznać za obiektywną (30).

W niniejszej pracy przedstawione zostały wyniki obliczeń wpływu na środowisko produkcji gipsu budowlanego klasyfikowanego jako A1, zgodnie z EN 13279-1:2008, otrzymanego w następstwie odwodnienia gipsu naturalnego pochodzącego ze złoża Leszcze oraz gipsu syntetycznego uzyskiwanego w procesie odsiarczania spalin w Elektrowni Kozienice. Proces produkcji gipsu półwodnego prowadzony był w tym samym miejscu, tj. w spółce Dolina Nidy, w lokalizacji produkcyjnej w Leszczach.

## 2. Materiały i metody

Ocenę oddziaływania środowiskowego dwóch gipsów budowlanych wytwarzanych przez spółkę Dolina Nidy w zakładzie produkcyjnym w Leszczach, przeprowadzono wykorzystując metodę oceny cyklu życia [LCA]. Ocenę LCA przeprowadzono zgodnie z zasadami opisanymi w dokumencie ITB PCR A (31) i wymaganiami normy EN 15804. Weryfikację deklaracji środowiskowej III typu przeprowadzono zgodnie z normą ISO 14025 (32). Do analizy wykorzystano rzeczywiste dane produkcyjne z roku 2017. Gips naturalny wydobywano w Kopalni Leszcze, odległej około 500 metrów od zakładu produkcyjnego, zaś gips syntetyczny pochodził z procesów odsiarczania spalin w odległej o około 180 km od Leszczy Elektrowni Kozienice.

Proces produkcji gipsu budowlanego, klasyfikowanego jako A1 zgodnie z EN 13279-1:2008, z wykorzystaniem surowca pochodzenia naturalnego oraz syntetycznego, przedstawiono na rysunku 1.

Cykl życia będący przedmiotem analizy obejmował moduły od A1 do A3, tj. od wydobycia gipsu naturalnego ze złoża Leszcze lub odbioru gipsu z odsiarczania spalin ze składowiska w Elektrowni Ko-

In the case of manufacturers, the environmental impact assessment of construction products is also a process of continuous improvement of their production and purchasing processes (29). Conduct an environmental impact assessment based on source production data actual industrial conditions, are the basis for considering this assessment as objective (30).

This paper presents the results of calculations of the environmental impact of the production of construction gypsum classified as A1, under EN 13279-1:2008, obtained as a result of dehydration of natural gypsum from the Leszcze deposit and synthetic gypsum obtained in the flue gas desulfurization process at Kozienice Power Plant. The gypsum burning process was carried out in the same place, at the Dolina Nidy company in the production location in Leszcze.

## 2. Materials and methods

The environmental impact assessment of two building gypsums produced by the Dolina Nidy company in the production plant in Leszcze, was carried out using the Life Cycle Assessment [LCA] method. The LCA assessment was carried out following the principles described in the ITB PCR A document (31) and the requirements of EN 15804. Type III EPD was verified under ISO 14025 (32). The actual production data from 2017 was used for the analysis. Natural gypsum was excavated in the Leszcze quarry, located approximately 500 meters from the production plant. Synthetic gypsum was obtained from flue gas desulfurization processes in Kozienice Power Plant 180 km far from Leszcze.

The production process of building gypsum, classified as A1 under EN 13279-1:2008, with natural and synthetic materials, is shown in Figure 1.

The life cycle being analyzed covered modules from A1 to A3, i.e., from the extraction of natural gypsum from the Leszcze deposit, or the collection of gypsum from flue gas desulfurization from the Kozienice Power Plant landfill to obtaining the finished product [building gypsum], which can be collected from the production plant gate in Leszcze. The characteristics of the individual modules include excavating and processing of raw materials, production of secondary materials, including recycling processes [module A1], transport [module A2], and production [A3]. Municipal waste and production sewage have been assigned to module A3. The energy consumption has been inventoried for the entire production process. Plant emissions were measured and allocated to module A3. The calculation considers all relevant parameters from the collected production data, and the sum of omitted data does not exceed 5% of all impact categories. The environmental assessment applies to the basic unit of the product, which is 1 kilogram of construction product. In the calculations, the principle of mass allocation was used, i.e., the weighted average mass of the products concerned, except for the desulfurization process, where economic allocation was used, i.e., gypsum is a co-product in the production of heat and electricity. In line with EN 15804, machinery and equipment

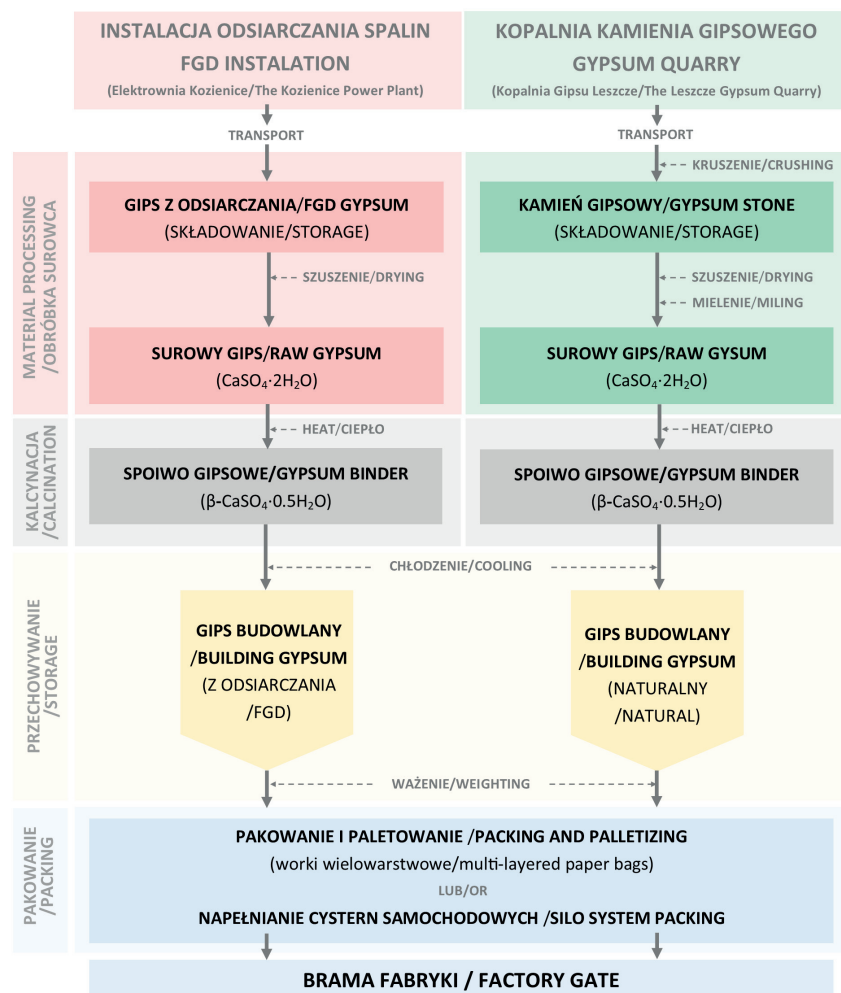
zienie, aż do uzyskania gotowego produktu [gipsu budowlanego], który można odebrać z bramy zakładu produkcyjnego w Leszczach. Charakterystyka poszczególnych modułów obejmuje wydobycie i przeróbkę surowca, wytwarzanie materiałów wtórnych, w tym procesy recyklingu [moduł A1], transport [moduł A2] oraz produkcję [A3]. Odpady komunalne i ścieki produkcyjne zostały przyporządkowane do modułu A3. Zużycie energii zostało zinwentaryzowane dla całego procesu produkcyjnego. Zmierzone emisje z zakładu produkcyjnego alokowane w module A3. W kalkulacji uwzględniono wszystkie istotne parametry z zebranych danych produkcyjnych, zaś suma pominiętych danych nie przekroczyła 5% z wszystkich kategorii oddziaływania. Ocena środowiskowa odnosi się do podstawowej jednostki wyrobu jaką jest 1 kilogram gipsu budowlanego. W obliczeniach zastosowano zasadę alokacji masowej tj. średnich ważonych masy danych wyrobów, wyjątkiem jest proces odsiarczania, w którym zastosowano alokację ekonomiczną, tj. gips jest współproduktem przy produkcji ciepła i energii elektrycznej. Zgodnie z EN 15804 maszyny i urządzenia wykorzystywane do produkcji oraz transport pracowników były wyłączone z oceny.

Użyte w analizie dane środowiskowe pochodzą ze zweryfikowanych źródeł danych takich jak: Ecoinvent v.3.5., ELCD, Ullmann's, ITB-Data oraz wybranych deklaracji środowiskowych III typu. Dodatkowo w analizie wykorzystano dane uzyskane w wyniku zewnętrznego audytu systemu ISO 14001. Wartości uzyskanych wskaźników oddziaływania środowiskowego zostały zweryfikowane przez zewnętrznych i niezależnych od producenta ekspertów (33).

### 3. Wyniki badań i ich analiza

W tabelicy 1 przedstawiono wartości siedmiu wskaźników oddziaływania środowiskowego oraz wartości dwóch wskaźników dotyczących aspektów środowiskowych w zakresie modułów od A1 do A3 związanych z wyprodukowaniem 1 kg gipsu budowlanego, z wykorzystaniem gipsu pochodzącego ze złoża naturalnego oraz z odsiarczania spalin.

Dla wszystkich dziewięciu analizowanych w niniejszej pracy wskaźników oddziaływania środowiskowego wartości uzyskane dla gipsu budowlanego pochodzącego z gipsu z odsiarczania spalin, są wyższe niż dla gipsu budowlanego, uzyskanego w procesie prażenia gipsu pochodzenia naturalnego. W celu zobrazowania,



Rys. 1. Proces produkcji gipsu budowlanego z wykorzystaniem surowca pochodzenia naturalnego z Kopalni Leszcze oraz gipsu z odsiarczania spalin z Elektrowni Kozenice. W procesie prażenia gipsu jako paliwo zastosowano gaz naturalny.

Fig. 1. The production process of building gypsum using raw material from the Leszcze quarry and gypsum from flue gas desulfurization from Kozenice Power Plant. Natural gas was used as a fuel in the gypsum calcination (burning) process.

used for the production and transport of workers were excluded from the assessment.

The environmental data used in the analysis comes from verified data sources such as Ecoinvent v.3.5., ELCD, Ullmann's, ITB-Data, and selected type III environmental declarations. Additionally, the analysis used data obtained as a result of an external system audit ISO 14001. The values of the obtained environmental impact indicators were verified by external experts, independent of the manufacturer (33).

### 3. Results and analysis

Table 1 presents the values of seven environmental impact indicators and the values of two indicators for environmental aspects in the range of modules A1 to A3 related to 1 kg of building gypsum, from natural or FGD gypsum.

For all nine environmental impact indicators analyzed in this study, the values obtained for building gypsum derived from flue gas de-

Tablica 1 / Table 1

CHARAKTERYSTYKA ŚRODOWISKOWA 1 KG GIPSU BUDOWLANEGO WYTWORZONEGO Z GIPSU POCHODZENIA NATURALNEGO [ZŁOŻE LESZCZE] ORAZ GIPSU BUDOWLANEGO WYPRODUKOWANEGO Z GIPSU Z ODSIARCZANIA SPALIN. DANE DOTYCZĄ GIPSU BUDOWLANEGO ODBIERANEGO LUZEM W AUTOCYSTERNACH

ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF 1 KG OF BUILDING GYPSUM MADE OF GYPSUM OF NATURAL ORIGIN [LESZCZE] AND BUILDING GYPSUM MADE OF FGD GYPSUM. THE DATA APPLIES TO BUILDING GYPSUM COLLECTED IN BULK IN A SILO

Wskaźnik Indicator	Jednostka Unit	A1 – A3	
		Gips budowlany naturalny Natural building gypsum	Gips budowlany z odsiarczania FGD building gypsum
Wskaźnik środowiskowy, 1 kg wyrobu / Environmental impact: 1 kg of product			
Potencjał globalnego ocieplenia, GWP / Global warming potential, GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	1.24 × 10 <sup>-1</sup>	1.27 × 10 <sup>-1</sup>
Potencjał uszczuplenia stratosferycznej warstwy ozonowej, ODP Depletion potential of the stratospheric ozone layer, ODP	kg CFC 11 eq.	2.28 × 10 <sup>-10</sup>	1.88 × 10 <sup>-9</sup>
Potencjał zakwaszenia gleby i wody, AP / Acidification potential of soil and water, AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	1.57 × 10 <sup>-4</sup>	2.25 × 10 <sup>-4</sup>
Potencjał eutrofizacji, EP / Eutrophication potential, EP	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq.	3.44 × 10 <sup>-6</sup>	4.68 × 10 <sup>-6</sup>
Potencjał tworzenia ozonu troposferycznego POCP Formation potential of tropospheric ozone, POCP	kg Ethene eq.	9.54 × 10 <sup>-6</sup>	2.68 × 10 <sup>-5</sup>
Potencjał uszczuplenia zasobów abiotycznych [ADP-pierwiastki] w przypadku zasobów niekopalnych Abiotic depletion potential [ADP-elements] for non-fossil resources	kg Sb eq.	1.24 × 10 <sup>-5</sup>	2.00 × 10 <sup>-5</sup>
Potencjał uszczuplenia [ADP-paliwa kopalne] w przypadku zasobów kopalnych Abiotic depletion potential [ADP-fossil fuels] for fossil resources	MJ	1.07 × 10 <sup>0</sup>	1.14 × 10 <sup>0</sup>
Aspekty środowiskowe związane z użyciem surowców, 1 kg produktu Environmental aspects related to the consumption of raw materials, 1 kg of product			
Całkowite zużycie zasobów odnawialnej energii pierwotnej [energia pierwotna i zasoby energii pierwotnej stosowanej jako surowce], PERT Total use of renewable primary energy resources [primary energy and primary energy resources used as raw materials], PERT	MJ	1.85 × 10 <sup>-2</sup>	2.57 × 10 <sup>-2</sup>
Całkowite zużycie zasobów nieodnawialnej energii pierwotnej (energia pierwotna i zasoby energii pierwotnej stosowanej jako surowce), PENRT Total use of non-renewable primary energy resources (primary energy and primary energy resources used as raw materials), PENRT	MJ	1.12 × 10 <sup>0</sup>	1.20 × 10 <sup>0</sup>

w sposób graficzny, różnicę pomiędzy obciążeniem środowiskowym związanym z produkcją gipsu budowlanego z surowca pochodzącego z elektrowni a surowcem pochodzenia naturalnego, przyjęto wartość wskaźnika oddziaływania środowiskowego dla gipsu budowlanego uzyskanego z gipsu z odsiarczania spalin za sto procent, następnie obliczono ile procent tej wartości stanowi wartość wskaźnika dla gipsu budowlanego z surowca pochodzenia naturalnego. Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 2.

Pomimo, że gips jest powszechnie stosowanym spoiwem mineralnym, zaś zagadnienia oddziaływania wyrobów budowlanych na środowisko są kluczowe dla funkcjonowania i rozwoju naszej cywilizacji, liczba prac w czasopismach naukowych o tej tematyce jest ograniczona, a prezentowane dane nie zawsze są jednoznaczne (34-39).

W przypadku analizowanych w niniejszej pracy gipsów budowlanych największą wartością wskaźnika potencjału globalnego ocieplenia GWP wynoszącą 0,127 kg CO<sub>2</sub> eq. na 1 kg [127 kg CO<sub>2</sub> eq. na 1 tonę] wytworzonego produktu ma gips budowlany uzyskany z prażenia gipsu z odsiarczania spalin. Różnica jest

sulfurization gypsum, are higher than for building gypsum obtained by burning of natural gypsum. To visualize, in a graphic way, the difference between the environmental burden associated with the production of building gypsum from two different raw materials, the value of the environmental impact indicator for building gypsum made of FGD gypsum was assumed to be one hundred percent. Then, the percentage of this value was calculated as the index value for building gypsum, produced of natural raw material. The calculation results are presented in Figure 2.

Although gypsum is a commonly used mineral binder, and the issues of the impact of construction products on the environment are crucial for the functioning and development of our civilization, the number of papers in scientific journals on this subject is limited, and the presented data are not always precise (34-39).

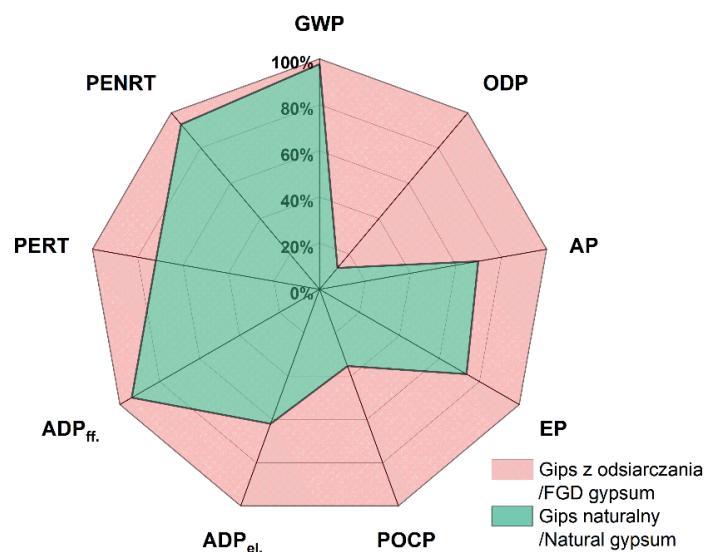
In the case of the building gypsum analyzed in this study, a higher value of the global warming potential GWP of 0.127 kg CO<sub>2</sub> eq. for 1 kg [127 kg CO<sub>2</sub> eq. per 1 tonne] of the product produced is presented by building gypsum obtained from the burning of FGD gypsum. The difference is insignificant and amounts to only

nieznaczna i wynosi w zakresie wskaźnika GWP jedynie 0,003 kg CO<sub>2</sub> eq. na 1 kg produktu – gipsu budowlanego. Dla porównania obliczenia wykonane na podstawie danych różnych producentów w Czechach wykazały, że wyprodukowanie 1 tony gipsu z wykorzystaniem surowca pochodzącego z procesów odsiarczania spalin, wiąże się z emisją 105,3 kg CO<sub>2</sub> eq. i wartość ta jest o 25,2% mniejsza od GWP dla gipsu uzyskanego z naturalnego surowca z kopalni Koberice zlokalizowanej w północno-wschodnim rejonie Czech (36). GWP dla gipsu budowlanego uzyskanego z surowca z kopalni Koberice wynosił 140,7 kg CO<sub>2</sub> eq. na 1 tonę produktu. Warto zaznaczyć, że obliczenia wskaźników oddziaływania środowiskowego dla gipsu produkowanego w Czechach wykonano zgodnie z inną normą, tj. ISO 14067 (40). W przypadku gipsów produkowanych w Czechach określono także, że 55% wartości GWP dla gipsu produkowanego z surowca pochodzenia naturalnego i 72% wartości GWP dla gipsu produkowanego z gipsu z odsiarczania spalin, stanowi proces prażenia.

W przypadku analizowanych w niniejszej pracy dwóch gipsów budowlanych dla wskaźnika GWP udział modułu A3 obejmującego produkcję gipsu budowlanego wyniósł 92,3% i 89,7%. Dotyczy to odpowiednio produktu wytworzonego z surowca pochodzenia naturalnego i surowca będącego produktem ubocznym w procesie odsiarczania spalin. Jest kilka elementów różnicujących proces produkcji gipsu budowlanego z surowca powstałego w procesie odsiarczania spalin, od surowca pochodzenia naturalnego. Należą do nich widoczne na rysunku 1 operacje kruszenia kamienia gipsowego oraz jego późniejszego mielenia, w przypadku surowca pochodzenia naturalnego. Warto też dodać, że pomiędzy surowcem z elektrowni a surowcem naturalnym występują różnice w zakresie wilgotności. Średnia wilgotność gipsu z odsiarczania spalin w analizowanym okresie wynosiła 9,3%, podczas gdy dla gipsu pochodzenia naturalnego jedynie 4,1%.

Wartość wskaźnika potencjału uszczuplenia stratosferycznej warstwy ozonowej [ODP], ilościowo ocenia wpływ poszczególnych substancji chemicznych na warstwę ozonową. Niezależnie od tego czy do produkcji gipsu budowlanego został wykorzystany surowiec naturalny czy z odsiarczania spalin [odpowiednio  $2,28 \cdot 10^{-10}$  i  $1,88 \cdot 10^{-9}$  kg CFC 11 eq.], jest on nieznaczny, w odniesieniu do freonu oznaczonego jako czynnik R11, którego skuteczność niszczenia przyjęto za jeden. Jednak dla gipsu budowlanego produkowanego z surowca z procesu odsiarczania spalin, wartość wskaźnika ODP jest około ośmiokrotnie większa niż wartość wskaźnika ODP dla gipsu budowlanego wytworzonego z surowca pochodzenia naturalnego.

Potencjał zakwaszenia gleby i wody [AP] wyrażony jako ekwiwalent SO<sub>2</sub> odnosi się do emisji SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, NH<sub>3</sub> i HF. Produkcja jednej tony gipsu budowlanego z surowca pochodzącego z procesów odsiarczania spalin wiąże się z emisją 0,225 kg SO<sub>2</sub> eq., zaś w przypadku wykorzystania surowca pochodzenia naturalnego z emisją o 0,068 kg SO<sub>2</sub> eq. mniejszą. W przypadku materiałów budowlanych bardzo rzadko dostępne są dane na temat wpływu produkcji materiału budowlanego na zakwaszenie gleby i wody. Zwiększenie zakwaszenia gleb użytków rolnych, spośród których



Rys. 2. Wskaźniki oddziaływania środowiskowego gipsu budowlanego wyprodukowanego z surowca pochodzenia naturalnego i gipsu budowlanego wytworzonego z gipsu z odsiarczania spalin.

Fig. 2. Indicators of the environmental impact of the produced building gypsum from the raw material of natural origin and building gypsum made of FGD gypsum.

0.003 kg CO<sub>2</sub> eq in GWP for 1 kg of the product [building gypsum]. For comparison, calculations made based on data from various producers in the Czech Republic were shown that the production of 1 tonne of gypsum, using the raw material from flue gas desulfurization processes is associated with the emission of 105.3 kg CO<sub>2</sub> eq. This value is 25.2% lower than the GWP for gypsum obtained from natural raw material from the Koberice quarry, located in the north-eastern region of the Czech Republic (36). GWP for building gypsum obtained from raw material from the Koberice quarry was 140.7 kg CO<sub>2</sub> eq. for 1 tonne of product. It is worth noting that the calculations of the environmental impact indicators for gypsum produced in the Czech Republic, were performed using a different standard, i.e., ISO 14067 (40). For the gypsum produced in the Czech Republic, it was also determined that 55% of the GWP value of gypsum from natural raw material and 72% of the GWP value of the gypsum produced from FGD gypsum is the burning process.

In the case of the building gypsums analyzed in this study, for the GWP index, the share of A3 module covering the production of building gypsum was 92.3% and 89.7%, respectively, for the product made of natural raw material and the raw material that is a by-product in the flue gas desulfurization process. Several elements differentiate building gypsum production from the raw material obtained in the flue gas desulfurization process, from the raw material of natural origin. These include the operations of crushing gypsum stone, shown in Fig. 1, and its subsequent grinding in the case of raw material of natural origin. It is also worth adding that there are differences in moisture content between the raw material from the power plant and the natural raw material. The average moisture content of FGD gypsum in the analyzed period was 9.3%, while for natural gypsum, it was only 4.1%.



aż 50% w Polsce ma bardzo kwaśny i kwaśny odczyn, wpływa negatywnie na środowisko i jest barierą w produkcji roślinnej (41). Ten aspekt jest dodatkowo ważny w polskich realiach z powodu znacznego potencjału krajowego rolnictwa.

W zakresie potencjału eutrofizacji [EP] wyrażanego jako ekwiwalent anionów ortofosforanowych (V) produkcja gipsu budowlanego z wykorzystaniem surowca pochodzącego z procesów odsiarczania spalin wiąże się z większą o 26,5% wartością tego wskaźnika niż w przypadku wykorzystania gipsu pochodzenia naturalnego. Wyprodukowanie jednej tony gipsu budowlanego w wyniku procesu prażenia gipsu pochodzenia naturalnego oznacza powstanie  $3,44 \cdot 10^{-3}$  kg równoważnika anionu ortofosforanowego.

Potencjał tworzenia ozonu troposferycznego [POCP] – ozonu przy powierzchni, toksycznego dla organizmów żywych jest wyrażany jako ekwiwalent etenu [etylenu]. Wyprodukowanie jednej tony gipsu budowlanego z surowca pozyskiwanego z elektrowni oznacza emisję 0,0268 kg równoważnika etenu, zaś w przypadku wykorzystania surowca pochodzenia naturalnego, ta emisja jest około ponad dwu i pół krotnie mniejsza.

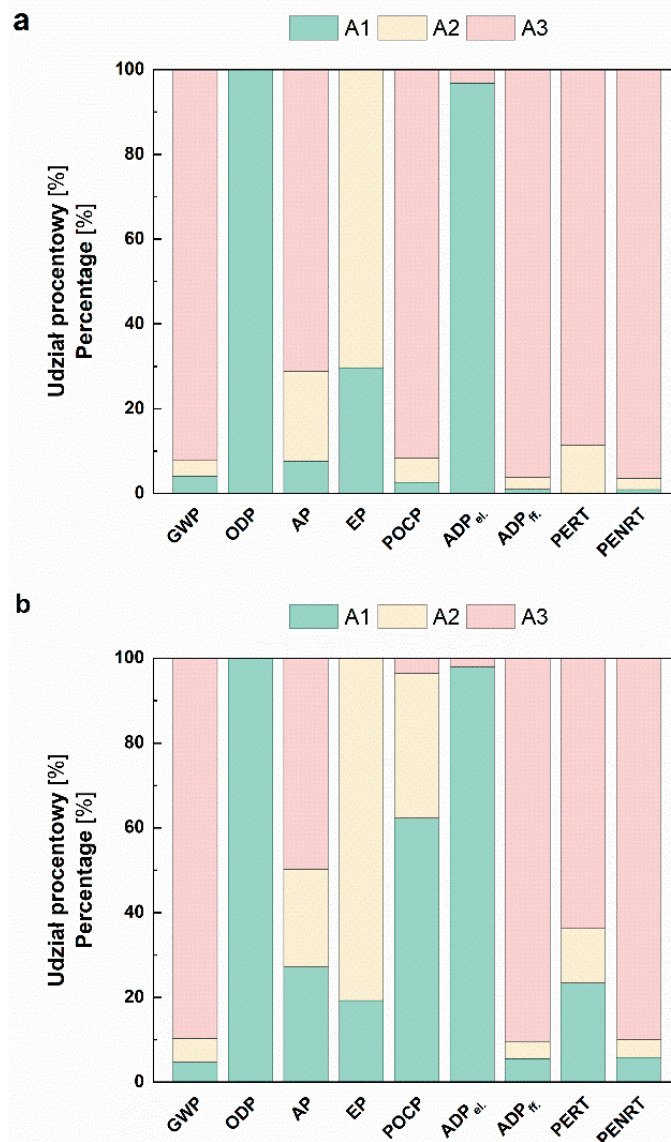
Potencjał uszczuplenia zasobów abiotycznych [ADP-pierwiastki] w przypadku zasobów niekopalnych, związany z wytworzeniem gipsu budowlanego z surowca pochodzenia naturalnego, jest o 38% mniejszy niż przy zastosowaniu gipsu dwuwodnego z odsiarczania spalin. Także w przypadku potencjału uszczuplenia [ADP-paliwa kopalne] w przypadku zasobów kopalnych wytworzenie gipsu budowlanego z surowca naturalnego związane jest z mniejszym obciążeniem dla środowiska, niż przy wykorzystaniu jako surowca gipsu pochodzącego z procesu odsiarczania spalin. Dla tego wskaźnika różnica jest jednak mniejsza i wynosi nieco ponad 6%.

W zakresie dwóch analizowanych w pracy aspektów środowiskowych związanych z użyciem surowców PERT i PENRT produkcja gipsu budowlanego z surowca naturalnego wiąże się z mniejszym o 28% zużyciem zasobów odnawialnej energii pierwotnej oraz z mniejszym o prawie 7% zużyciem zasobów nieodnawialnej energii pierwotnej, niż w przypadku wykorzystania surowca pochodzącego z procesu odsiarczania spalin.

Na rysunku 3 przedstawiono udział procentowy poszczególnych modułów: A1, A2 oraz A3 w całym procesie od pozyskania surowca do bramy fabryki dwóch analizowanych gipsów budowlanych, dla wszystkich omawianych w pracy wskaźników oddziaływania środowiskowego.

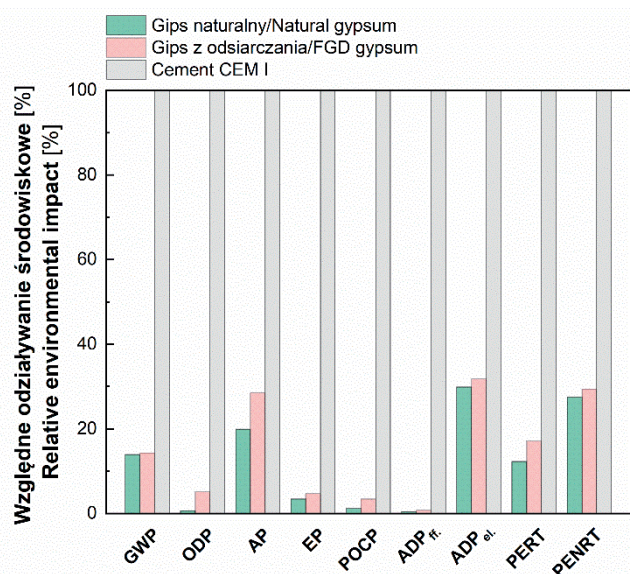
Dla większości analizowanych w pracy wskaźników środowiskowych, tj. GWP, AP, POCP, ADP-pierwiastki, ADP-paliwa kopalne, PERT i PENRT, udział modułów A1 oraz A2 w sumie modułów A1, A2 i A3 jest większy dla gipsu budowlanego produkowanego z gipsu z odsiarczania spalin niż gipsu budowlanego z surowca naturalnego. W przypadku modułu A1 związane jest to, między innymi, z większą średnią wilgotnością gipsu z odsiarczania spalin w analizowanym okresie, która wynosiła średnio 9,3%, podczas gdy dla gipsu naturalnego jedynie 4,1%. W przypadku modułu A2

The value of the stratospheric ozone depletion potential indicator [ODP], which quantitatively evaluates the effect of individual chemicals on the ozone layer for the building gypsum production process, regardless of whether natural raw material or flue gas desulfurization was used for the production of gypsum ( $2,28 \cdot 10^{-10}$  i  $1,88 \cdot 10^{-9}$  kg CFC 11 eq., respectively), is insignificant to the freon marked as R11 factor, the destruction efficiency of which was assumed to be one. However, for building gypsum produced from raw material from the flue gas desulfurization process, the ODP value is about eight times higher than the ODP value, for building gypsum from natural raw materials.



Rys. 3. Udział poszczególnych modułów: A1, A2 oraz A3 w analizowanych wskaźnikach oddziaływania środowiskowego dla: (a) gipsu budowlanego wytworzonego z surowca pochodzenia naturalnego, (b) gipsu budowlanego wyprodukowanego z gipsu pochodzącego z procesu odsiarczania spalin.

Fig. 3. Share of individuals modulus: A1, A2 and A3 in the analysed indicators of the environmental influence of: (a) building gypsum produced from natural raw material, (b) building gypsum produced from gypsum of flue gas desulfurization.



Rys. 4. Wskaźniki oddziaływania środowiskowego gipsu budowlanego wyprodukowanego z surowca pochodzenia naturalnego, gipsu budowlanego wytworzonego z gipsu z odsiarczania spalin oraz cementu portlandzkiego CEM I [dla cementu portlandzkiego CEM I wykorzystano dane opublikowane przez Stowarzyszenie Producentów Cementu (42)].

Fig. 4. Indicators of the environmental impact [modules A1-A3] of the building gypsum from natural raw material, FGD building gypsum, and CEM I Portland cement [for CEM I Portland cement data published by the Polish Cement Producers Association (42) were used].

związanego z transportem, wyższy udział tego modułu dla gipsu budowlanego otrzymanego z gipsu z odsiarczania spalin, wiąże się z odległością pomiędzy składowiskiem surowca na terenie Elektrowni Kozienice a zakładem, w którym produkowany jest gips budowlany.

Rozważając oddziaływanie środowiskowe w produkcji gipsu budowlanego naturalne jest odniesienie uzyskanych danych do analogicznych wskaźników dla cementu. Jest to najpowszechniej używane spoiwo mineralne na świecie, którego produkcja jest stale optymalizowana w związku z ograniczeniem emisji dwutlenku węgla (42). Na rysunku 4 przedstawiono porównanie wartości dziewięciu analizowanych w pracy wskaźników środowiskowych uzyskanych dla gipsu budowlanego wyprodukowanego z surowca naturalnego ze złoża Leszcze i surowca pochodzenia naturalnego, z wartościami wskaźników obliczonych dla cementu portlandzkiego CEM I wyprodukowanego w Polsce w roku 2019 (43). Cement portlandzki CEM I spośród wszystkich cementów powszechnego użytku ma największe wartości wskaźników środowiskowych.

#### 4. Wnioski

Budownictwo zużywa każdego roku ogromne ilości materiałów budowlanych, wytwarzając równocześnie znaczne ilości odpadów. Znajomość oddziaływania środowiskowego materiałów budowlanych jest ważna dla inwestorów i projektantów, podejmujących decyzje o wyborze materiałów. Pomimo dużego, najczęściej negatywnego wpływu na środowisko, materiały budowlane nie

The soil and water acidification potential [AP] expressed as SO<sub>2</sub> equivalent relates to the emissions of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, NH<sub>3</sub>, and HF. Production of one tonne of building gypsum from FGD raw material is associated with the emission of 0.225 kg SO<sub>2</sub> eq., and using the raw material of natural origin with the emission of 0.068 kg SO<sub>2</sub> eq. lower. Data on the impact of building material production are very rarely available for soil and water acidification. Increasing the acidification of arable land soils, as much as 50% of which in Poland have the very acidic and acidic reaction, negatively impacts the environment and is a barrier to plant production (41). This aspect is especially important in the case of Poland, because of the significant potential of domestic agriculture.

In terms of the eutrophication potential [EP], expressed as an equivalent of orthophosphate anions (V), the production of building gypsum with the use of raw material from flue gas desulfurization processes, is associated with a 26.5% higher value of this indicator than in the case of the use of natural gypsum. The production of one tonne of building gypsum by burning gypsum of natural origin produces 3.44 · 10<sup>-3</sup> kg of orthophosphate (V) anion equivalent.

The tropospheric ozone formation potential [POCP] - surface ozone toxic to living organisms is expressed as the ethene [ethylene] equivalent. The production of one tonne of building gypsum from raw materials obtained from power plants emits 0.0268 kg of ethene equivalent. This emission is slightly over two and a half times lower for using raw materials of natural origin.

The abiotic depletion potential [ADP-elements] for non-fossil resources associated with building gypsum from natural raw material is 38% lower than when using FGD gypsum. Also, in the case of the depletion potential [ADP-fossil fuels] of fossil resources, building gypsum production from natural raw material is associated with a lower load for the environment, than the processing of FGD gypsum. However, for this indicator, the difference is more inferior and amounts to slightly more than 6%.

In terms of the two environmental aspects analyzed in the study, related to the use of PERT and PENRT raw materials, the production of building gypsum from natural raw materials is associated with a 28% lower consumption of renewable primary energy resources and with almost 7% lower consumption of non-renewable primary energy resources, than in the case of use FGD gypsum.

Figure 3 shows the percentage of individual modules: A1, A2, and A3 in the entire process from obtaining the raw material to the factory gate of two analyzed building gypsum for all environmental impact indicators, discussed in the paper.

For the majority of environmental indicators analyzed in the study, i.e., GWP, AP, POCP, ADP<sub>el</sub>, ADP<sub>ff</sub>, PERT and PENRT, the share of module A1 and module A2 in the total of modules A1, A2, and A3 is higher for building gypsum made of gypsum from desulfurization exhaust gas, than for building gypsum made of natural material. In module A1, it is related, among other things, to a higher average moisture content of gypsum from flue gas desulfurization in the analyzed period, which was on average 9.3%. In comparison, for

podlegają obowiązkowej ocenie w tym zakresie. Dodatkowo, publikowane dane nie zawsze są zrozumiałe dla odbiorcy.

W pracy ocenie w zakresie oddziaływania środowiskowego poddano dwa gipsy budowlane – jeden produkowany z surowca naturalnego pochodzącego ze złoża Leszcze, drugi zaś z surowca pochodzącego z procesów odsiarczania spalin w Elektrowni Kozienice. Porównano wyniki uzyskane dla dziewięciu następujących wskaźników: GWP, ODP, AP, EP, POCP, ADP-pierwiastki, ADP-paliwa kopalne, PERT i PENRT. Dla wszystkich dziewięciu analizowanych w niniejszej pracy wskaźników oddziaływania środowiskowego [moduły A1, A2 i A3] wartości uzyskane dla gipsu budowlanego produkowanego z gipsu z odsiarczania spalin są większe niż dla gipsu budowlanego uzyskanego w procesie kalcynacji gipsu pochodzenia naturalnego. Wartość wskaźnika potencjału globalnego ocieplenia – GWP dla gipsu budowlanego produkowanego z surowca pochodzącego z procesów odsiarczania spalin wynosi 127 kg CO<sub>2</sub> eq. na 1 tonę produktu i jest o 3 kg CO<sub>2</sub> eq. większa niż dla gipsu budowlanego, do produkcji którego użyto surowca pochodzenia naturalnego. Różnice pomiędzy wskaźnikami oddziaływania środowiskowego gipsu budowlanego produkowanego z surowca pochodzącego z procesów odsiarczania spalin od surowca pochodzenia naturalnego wynikają z różnicy odległości pomiędzy miejscem pozyskania surowca [składowisko gipsu z odsiarczania na terenie Elektrowni Kozienice oddalone o 180 km od kopalni i zakładu produkcyjnego], operacji kruszenia i mielenia surowca pochodzenia naturalnego, a także dużych różnic w wilgotności pomiędzy tymi surowcami.

## Literatura / References

1. D. W. Kingery, P. B. Vandiver, M. Prickett, The beginnings of pyrotechnology, part II: production and use of lime and gypsum plaster in the Pre-Pottery Neolithic Near East. *J. Field Archaeol.* **15**(2), 219-243 (1988). <https://doi.org/10.1179/009346988791974501>.
2. T. Kawiak, Gypsum mortars from a twelfth-century church in Wiślica, Poland. *Studies in conservation* **36**(3), 142-150 (1991). <https://doi.org/10.1179/sic.1991.36.3.142>.
3. S. Chłędziński, *Spojwa gipsowe w budownictwie*. Dom Wydawniczy Medium, Warszawa, 2008.
4. J. Szlugaj, W. Naworyta, Analiza zmian podaży gipsu w Polsce w świetle rozwoju odsiarczania spalin w elektrowniach konwencjonalnych/Analysis of the Changes in Polish Gypsum Resources in the Context of Flue Gas Desulfurization in Conventional Power Plants. *Gospod. Surowcami Min.* **31**(2), 93-108 (2015). <https://doi.org/10.1515/gospo-2015-0020>.
5. Główny Urząd Statystyczny, *Produkcja ważniejszych wyrobów przemysłowych*. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/przemysl-budownictwo-srodki-trwale/przemysl/produkcja-wazniejszych-wyrobow-przemyslowych-w-lutym-2021-roku,2,107.html> (accessed 23.03.2021).
6. Z. Chrzanowski, B. Baran, M. Dudziak, R. Katzor, Polska jako potencjalne źródło ubocznych produktów spalania (UPS) dla rynków europejskich. (in Polish). XXVI Międzynarodowa Konferencja Popioły z energetyki, 08-10.10.2019, Sopot, Poland.
7. Bielecka, J. Kulczycka, Coal Combustion Products Management toward a Circular Economy - A Case Study of the Coal Power Plant Sector in Poland. *Energies* **13**(14), 3603 (2020). <https://doi.org/10.3390/en13143603>.
8. European Commission. *The European Green Deal*. Brussels, Belgium, 2019.

gypsum of natural origin, it was only 4.1%. For the A2 module [transport] the higher share of this module for building gypsum made of FGD gypsum in the entire process is related to the distance between the raw material storage in Kozienice Power Plant and the plant where building gypsum is produced.

Considering the environmental impact of building gypsum production is obvious to refer the obtained data to analogous indicators for cement, the most commonly used mineral binder globally, which is constantly optimized to reduce carbon dioxide emissions (42). Fig. 4 shows a comparison of the values of the nine analyzed in the study environmental indicators obtained for building gypsum produced from natural and FGD origin raw materials, with the values of indicators calculated for the Portland cement [CEM I] produced in Poland in 2019 (42). The highest values of environmental indicators has CEM I Portland cement, among all common types of cement.

## 4. Conclusions

The construction industry consumes vast quantity of building materials each year and generates significant amounts of waste. Knowing the environmental impact of building materials is essential for investors and designers, making decisions about the choice of materials. Despite the significant, most often negative environmental impact, building materials are not subject to mandatory assessment in this respect. Additionally, the published data is not always understandable for the recipient.

In the study, building gypsums were assessed in terms of environmental impact - one made of natural raw material from the Leszcze deposit, and the second one made of raw material from flue gas desulfurization processes, at Kozienice Power Plant. The results obtained for the following nine indicators were compared: GWP, ODP, AP, EP, POCP, ADP-elements, ADP-fossil fuels, PERT, and PENRT. For all nine environmental impact indicators analyzed in this paper (modules A1, A2, and A3), the values obtained for building gypsum made from FGD gypsum are higher than for building gypsum obtained by burning of natural gypsum. The value of the global warming potential indicator - GWP for building gypsum produced from raw material from flue gas desulfurization processes is 127 kg CO<sub>2</sub> eq. for 1 tonne of product and is 3 kg CO<sub>2</sub> eq. higher than for building gypsum from natural origin. The differences between the environmental impact indicators for building gypsum produced from FGD gypsum and raw material of natural origin, result from the difference in the distance between the place where the raw material was obtained [landfill of gypsum from desulfurization at Kozienice Power Plant, 180 km away from the quarry and production plant in Leszcze], crushing and grinding raw materials of natural origin, as well as significant differences in moisture content between the raw materials used.

9. Ministerstwo Aktywów Państwowych. <https://www.gov.pl/web/aktywa-panstwowe/w-katowicach-o-transformacji-gornictwa> (accessed 23.03.2021).
10. European Coal Combustion Products Association e.V. <http://www.ecoba.com/news/document.html?id=68> and <http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>.
11. G. Kowalczyk, Mniej spalonego węgla to problem dla branży budowlanej. *dziennik.pl*. <https://gospodarka.dziennik.pl/news/artykuly/7797527,wegiel-branza-budowlana-gips-cement.html> (accessed 23.03.2021).
12. Z. Yichao, W. Ying, Z. Jinghai, L. Jiayi, L. Tong, Basic characteristics and comprehensive utilization of FGD gypsum. *IOP C Ser. Earth Env.* **510**(5), 052002 (2020). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/510/5/052002>.
13. Y. Ma, Q. Nie, R. Xiao, W. Hu, B. Han, P. A. Polaczyk, B. Huang, Experimental investigation of utilizing waste flue gas desulfurized gypsum as backfill materials. *Constr. Build. Mater.* **245**, 118393 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118393>.
14. European Committee for Standardization (CEN). EN 13279-1:2008 Gypsum binders and gypsum plasters – Part 1: Definitions and requirements. Brussels, Belgium, 2008.
15. Regulation (EU) No. 305/2011 of the European Parliament and of the Council. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32011R0305> (accessed 23.03.2021).
16. European Committee for Standardization. EN 15804:2012. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Brussels, Belgium, 2012.
17. T. Brinkmann, L. Metzger, Ecological assessment based on environmental product declarations. In *Sustainable Productio.* in: F. Teuteberg, M. Hempel, L. Schebek (eds) *Progress in Life Cycle Assessment 2018. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management.* Springer, Cham. (2019). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12266-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12266-9_2).
18. J. Anderson, A. Moncaster, Embodied carbon of concrete in buildings, Part 1: Analysis of published EPD. *Build. Cities* **1**(1), 198–217 (2020). <http://doi.org/10.5334/bc.59>.
19. B. Waldman, M. Huang, K. Simonen, Embodied carbon in construction materials: a framework for quantifying data quality in EPDs. *Build. Cities* **1**(1), 625-636 (2020). <http://doi.org/10.5334/bc.31>.
20. B. M. Galindro, S. Welling, N. Bey, S. I. Olsen, S. R. Soares, S.-O. Ryding, Making use of life cycle assessment and environmental product declarations. A survey with practitioners. *J. Ind. Ecol.* **24**, 1–11 (2020). <https://doi.org/10.1111/jiec.13007>.
21. J. Tomaszewska, Gospodarka materiałowa w dobie transformacji gospodarczej/Material management in the face of the economic transformation. *Mater. Bud.* **3**, 36-38 (2021). <https://doi.org/10.15199/33.2021.03.06>.
22. G. L. F. Benachio, M. D. C. D. Freitas, S. F. Tavares, Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *J. Clean. Prod.* **260**, 121046 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>.
23. J. Tomaszewska, Polish Transition towards Circular Economy: Materials Management and Implications for the Construction. *Sector. Materials* **13**(22), 5228 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13225228>.
24. J. Michalak, B. Michałowski, Understanding of Construction Product Assessment Issues and Sustainability among Investors, Architects, Contractors and Sellers of Construction Products in Poland. *Energies*, **14**(7), 1941 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14071941>.
25. C. Meschede, The Sustainable Development Goals in Scientific Literature: A Bibliometric Overview at the Meta-Level. *Sustainability*, **12**(11), 4461 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12114461>.
26. S. Czernik, M. Marcinek, B. Michałowski, M. Piasecki, J. Tomaszewska, J. Michalak, Environmental Footprint of Cementitious Adhesives – Components of ETICS. *Sustainability* **12**(21), 8998 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12218998>.
27. L. Czarnecki, D. Gemert, Innovation in construction materials engineering versus sustainable development. *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.* **65**(6) 765-771 (2017). <https://doi.org/10.1515/bpasts-2017-0083>.
28. F. Pomponi, R. Crawford, A. Stephan, J. Hart, B. D'Amico, The 'building paradox': research on building-related environmental effects requires global visibility and attention. *Emerald Open Res.* **2**(50), 50 (2020). <https://doi.org/10.35241/emeraldopenres.13838.1>.
29. B. Ströbele, T. Lützkendorf, Communicating environmental information: rethinking options for construction products. *Build. Res. Inform.* **47**(6), 681-696 (2019). <https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1521191>.
30. S. Mjakuškina, M. Kavosa, I. Lapiņa, Achieving Sustainability in the Construction Supervision Process. *J. Open Innov. Techn. Market Complex.* **5**(3), 47 (2019). <https://doi.org/10.3390/joitmc5030047>.
31. Building Research Institute (ITB). ITB-EPD General PCR Annex A v1.4 PN-EN 15804+A1:2014-04 Based. Warsaw, Poland, (2014).
32. International Organization for Standardization (ISO). ISO 14025:2006 Environmental Labels and Declarations-Type III Environmental Declarations-Principles and Procedure. Geneva, Switzerland, (2006).
33. Dolina Nidy. Environmental Product Declaration, Construction gypsum, synthetic gypsum and anhydrite. Certificate No. 084/2019. Warsaw, Poland, (2019).
34. J. C. Lee, S. L. Bradshaw, T. B. Edil, C. H. Benson, Quantifying the benefits of flue gas desulfurization gypsum in sustainable wallboard production. In *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, pp. 9-12, Denver, USA, (2011).
35. Z. G. Peng, L. L. Ma, X. Z. Gong, Comparison of life cycle environmental impacts between natural gypsum board and FGD gypsum board. *Key Eng. Mater.* **599**, 15-18 (2014). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.599.15>.
36. J. Fořt, R. Černý, Carbon footprint analysis of calcined gypsum production in the Czech Republic. *J. Clean. Prod.* **177**, 795-802 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.002>.
37. M. A. Pedreño-Rojas, J. Fořt, R. Černý, P. Rubio-de-Hita, Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. *J. Clean. Prod.* **253**, 120056 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>.
38. A. Jiménez-Rivero, J. García-Navarro, Management of end-of-life gypsum in a circular economy. In *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*, Woodhead Publishing: New York, 69-79 (2020).
39. E. Baran, S. Czernik, M. Marcinek, B. Michałowski, M. Piasecki, J. Tomaszewska, J. Michalak, Quantifying Environmental Burdens of Plasters Based on Natural vs. Flue Gas Desulfurization (FGD) Gypsum. *Sustainability* **13**(8), 4298 (2021). <https://doi.org/10.3390/su13084298>.
40. International Organization for Standardization (ISO). ISO 14067:2018 Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification. Geneva, Switzerland, (2018).
41. P. Ochal, T. Jadczyzyn, B. Jurga, J. Kopiński, M. Matyka, A. Madej, A. Rutkowska, B. Smreczak, M. Łysiak, Środowiskowe aspekty zakwaszenia gleb w Polsce. *Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa, Puławy*, (2017).
42. W. Shanks, C. F. Dunant, M. P. Drewniak, R. C. Lupton, A. Serrenho, J. M. Allwood, J. M. How much cement can we do without? Lessons from cement material flows in the UK. *Resources, Conserv. Recycling*, **141**, 441-454 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.002>.
43. Stowarzyszenie Producentów Cementu. Environmental Product Declaration III Type No 116/2020, Cements CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V Produced in Poland,; Cracow, Poland, (2020).