

Wyzwania przemysłu wapienniczego w perspektywie rozwoju zrównoważonych materiałów ściennych

Challenges for the lime industry in the context of developing sustainable walling materials

Alina Masse^{1,*}, Łukasz Kosturkiewicz^{1,2}

¹Stowarzyszenie Przemysłu Wapienniczego

²Nordkalk Wapno Sp. z o.o.

*corresponding author: A. Masse, e-mail: alina.masse@wapno-info.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono główne zastosowania produktów wapienniczych w przemyśle, budownictwie, ochronie środowiska i rolnictwie. Omówiono perspektywy dekarbonizacji sektora produktów wapienniczych. Szczególną uwagę poświęcono wykorzystaniu niekalcynowanych mączek wapiennych jako niskoemisyjnych surowców do materiałów budowlanych, technologiom wychwytu i składowania CO₂ [CCS] oraz rekarbonatyzacji. Wykazano, że uwzględnienie całego cyklu życia produktów wapiennych, w tym wtórnego wiązania dwutlenku węgla, ma istotne znaczenie dla oceny ich rzeczywistego śladu węglowego i rozwoju zrównoważonych materiałów ściennych. Dodatkowo w artykule nakreślono wyzwania związane z transformacją energetyczną i koniecznością ograniczenia emisji CO₂, przed którymi stoi branża wapiennicza.

Słowa kluczowe: przemysł wapienniczy, dekarbonizacja, rekarbonatyzacja, mączka wapienna, zrównoważone materiały budowlane

Summary

The paper presents the main applications of lime products in industry, construction, environmental protection, and agriculture. The prospects for the decarbonisation of the lime products sector are discussed. Particular attention is given to the use of uncalcined limestone powders as low-carbon raw materials for construction materials, carbon capture and storage [CCS] technologies, and recarbonation. It is demonstrated that consideration of the entire life cycle of lime products, including the secondary uptake of carbon dioxide, is essential for assessing their actual carbon footprint and for the development of sustainable wall materials. In addition, the article outlines the challenges facing the lime industry in relation to the energy transition and the need to reduce carbon emissions.

Keywords: lime industry, decarbonisation, recarbonation, limestone powder, sustainable construction materials

1. Wprowadzenie

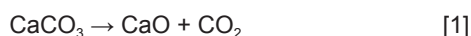
Polski przemysł wapienniczy znajduje się obecnie w okresie fundamentalnych przemian wynikających z postępującej transformacji energetycznej oraz konieczności ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Wapno należy do grupy materiałów mineralnych, których produkcja charakteryzuje się szczególnie wysoką emisją dwutlenku węgla, a jednocześnie pozostaje istotnym surowcem dla wielu gałęzi przemysłu, w tym budownictwa, produkcji materiałów ściennych, hutnictwa, przemysłu chemicznego, ochrony środowiska oraz gospodarki wodno-ściekowej. Specyfika sektora wapienniczego polega na tym, że znaczna część emisji CO₂ jest

1. Introduction

The Polish lime industry is currently undergoing a fundamental transformation driven by the ongoing energy transition and the need to reduce greenhouse gas emissions. Lime belongs to the group of mineral materials whose production is associated with particularly high carbon dioxide emissions, yet it remains an important raw material for numerous industrial sectors, including construction, the production of walling materials, metallurgy, the chemical industry, environmental protection, and water and wastewater management. A specific feature of the lime sector is that a significant proportion of CO₂ emissions is directly associated

bezpośrednio związana z przemianą chemiczną zachodzącą podczas produkcji wapna, a nie wyłącznie ze zużyciem energii.

W procesie kalcynacji węgla wapnia zachodzi reakcja rozkładu termicznego [1]:

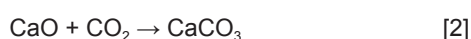


W konsekwencji emisje związane z produkcją wapna można podzielić na dwie zasadnicze grupy: emisje procesowe, wynikające z dekarbonatyzacji surowca, oraz emisje energetyczne związane ze spalaniem paliw dostarczających energii niezbędnej do prowadzenia procesu kalcynacji. Przyjmuje się, że około 2/3 całkowitych emisji sektora wapienniczego stanowią emisje procesowe, natomiast około 1/3 przypada na emisje związane ze spalaniem paliw. Taka struktura emisji powoduje, że pełna dekarbonizacja produkcji wapna jest znacznie bardziej złożonym zadaniem niż sama transformacja energetyczna zakładów.

Ograniczenie emisji paliwowych może być realizowane poprzez zwiększenie efektywności energetycznej pieców, wykorzystanie paliw alternatywnych, elektryfikację procesów oraz zastosowanie energii ze źródeł nisko- i zeroemisyjnych. Działania te, choć niezbędne, nie rozwiązują jednak problemu emisji procesowych. Ich eliminacja wymaga zastosowania innych mechanizmów technologicznych, obejmujących przede wszystkim wychwyt i trwałe zagospodarowanie dwutlenku węgla, mineralizację CO₂, zwiększenie efektywności wykorzystania wapna oraz rozwój technologii ograniczających zapotrzebowanie na materiały kalcynowane.

Znaczenie dekarbonizacji przemysłu wapienniczego wykracza przy tym poza sam sektor produkcji wapna. Wapno jest elementem łańcucha technologicznego wielu materiałów budowlanych, a jego ślad węglowy wpływa na całkowity bilans środowiskowy produktów końcowych. Szczególne znaczenie ma to w odniesieniu do materiałów ściennych, dla których poszukuje się obecnie rozwiązań umożliwiających znaczące ograniczenie emisji CO₂ przy zachowaniu wymaganych właściwości mechanicznych, użytkowych oraz trwałości. Osiągnięcie neutralności klimatycznej w produkcji materiałów ściennych wymaga zatem nie tylko optymalizacji samego procesu produkcyjnego, ale również analizy całego cyklu materiałowego – od pozyskania surowców, poprzez ich przetwarzanie i produkcję, aż po użytkowanie i zagospodarowanie materiału po zakończeniu jego eksploatacji.

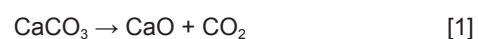
Szczególną rolę w tym układzie może odgrywać cykl wapienny. W procesie kalcynacji CaCO₃ przekształcany jest w CaO z jednoczesnym uwolnieniem CO₂, natomiast w dalszym etapie wapno może ponownie reagować z dwutlenkiem węgla, prowadząc do odtworzenia stabilnej fazy węglanowej [2]:



Zjawisko to, określane jako karbonatyzacja lub rekarbonatyzacja wapna, stanowi naturalny mechanizm ponownego wiązania części dwutlenku węgla uwolnionego podczas kalcynacji. W konsekwencji rzeczywisty bilans emisji produktów wapiennych powinien uwzględniać nie tylko emisje powstające na etapie ich

with the chemical transformation occurring during lime production, rather than being attributable solely to energy consumption.

During the calcination of calcium carbonate, the following thermal decomposition reaction takes place [1]:

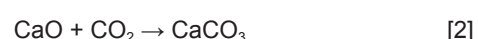


Consequently, emissions associated with lime production can be divided into two main categories: process emissions resulting from the decarbonation of the raw material and energy-related emissions associated with the combustion of fuels supplying the energy required to carry out the calcination process. It is generally assumed that approximately two-thirds of the total emissions from the lime sector are process emissions, while approximately one-third is attributable to fuel combustion. This emission structure means that achieving full decarbonisation of lime production is a considerably more complex challenge than merely transforming the energy systems of lime plants.

Reduction of fuel-related emissions can be achieved by increasing the energy efficiency of kilns, using alternative fuels, electrifying processes, and employing energy from low- and zero-emission sources. Although these measures are essential, they do not address the problem of process emissions. Their elimination requires the application of other technological approaches, primarily involving carbon dioxide capture and its permanent management, CO₂ mineralisation, increasing the efficiency of lime utilisation, and the development of technologies that reduce the demand for calcined materials.

The importance of decarbonising the lime industry extends beyond the lime production sector itself. Lime is an integral part of the technological chain of many construction materials, and its carbon footprint affects the overall environmental performance of the final products. This is particularly relevant to walling materials, for which solutions are currently being sought that would enable a significant reduction in CO₂ emissions while maintaining the required mechanical and functional properties and durability. Achieving climate neutrality in the production of walling materials therefore requires not only optimisation of the production process itself, but also an analysis of the entire material life cycle – from the extraction of raw materials, through their processing and production, to the use and end-of-life management of the material.

The lime cycle may play a particularly important role in this context. During the calcination process, CaCO₃ is converted into CaO with the simultaneous release of CO₂, while at a subsequent stage lime can react again with carbon dioxide, resulting in the regeneration of a stable carbonate phase [2]:



This phenomenon, referred to as carbonation or recarbonation of lime, constitutes a natural mechanism for the re-binding of a proportion of the carbon dioxide released during calcination.

wytwarzania, lecz również potencjał ponownego wiązania dwutlenku węgla podczas użytkowania. W szerszej perspektywie rozwój technologii przyspieszonej karbonatyzacji i mineralizacji dwutlenku węgla może stać się jednym z elementów transformacji sektora wapienniczego w kierunku gospodarki o obniżonej emisyjności.

Jednocześnie transformacja energetyczna i klimatyczna przemysłu wapienniczego nie powinna być postrzegana wyłącznie jako zagrożenie związane z rosnącymi kosztami emisji, energii i inwestycji technologicznych. Stanowi ona również szansę na zmianę struktury stosowanych surowców mineralnych oraz rozwój nowych, niskoemisyjnych materiałów budowlanych. Szczególne znaczenie mogą mieć w tym zakresie mączki wapienne otrzymywane poprzez mechaniczne rozdrabnianie i mielenie kamienia wapiennego, które nie wymagają procesu kalcynacji.

W przeciwieństwie do wapna palonego mączka wapienna pozostaje materiałem węglanowym i nie wymaga rozkładu węglanu wapnia z wydzielaniem dwutlenku węgla w procesie produkcyjnym. Jej zastosowanie jako dodatku mineralnego pozwala zatem wykorzystać właściwości surowca wapiennego bez ponoszenia emisji procesowej charakterystycznej dla produkcji CaO. W tym znaczeniu odpowiednio zaprojektowane mączki wapienne mogą stanowić surowiec mineralny niewymagający emisyjnego procesu dekarbonatyzacji, a nie jedynie materiał o zmniejszonym śladzie węglowym wynikającym z poprawy efektywności energetycznej.

Perspektywa ta jest szczególnie istotna dla technologii betonowych i materiałów ściennych. Częściowe zastąpienie składników wysokoemisyjnych przez niekalcynowane materiały wapienne może prowadzić do ograniczenia zużycia klinkieru i innych składników wymagających wysokotemperaturowego przetwarzania. Jednocześnie dostępność złóż wapieni w Polsce, rozwinięta infrastruktura wydobywcza oraz istniejące zaplecze przemysłu wapienniczego stwarzają potencjalne warunki do zwiększenia wykorzystania tego typu surowców w krajowym sektorze materiałów budowlanych.

W tym ujęciu transformacja przemysłu wapienniczego powinna być rozpatrywana nie tylko jako proces dekarbonizacji istniejących technologii produkcji wapna, lecz również jako szersza transformacja modelu wykorzystania surowców wapiennych. Obejmuje ona z jednej strony ograniczanie emisji związanych z produkcją wapna palonego oraz wapna gaszonego, rozwój technologii wychwytu i mineralizacji dwutlenku węgla oraz zwiększanie udziału rekarbonatyzacji, a z drugiej – zwiększenie wykorzystania surowców, które mogą być stosowane bez wcześniejszej kalcynacji.

Tak rozumiana transformacja może stać się jednym z istotnych elementów budowy nisko- i zeroemisyjnego łańcucha materiałów ściennych. Przejście od modelu opartego przede wszystkim na materiałach kalcynowanych do modelu wykorzystującego w większym stopniu surowce niekalcynowane, uzupełnione technologiami wychwytu i trwałego wiązania dwutlenku węgla, pozwala spojrzeć na przemysł wapienniczy nie tylko jako na źródło emisji, lecz również jako na potencjalnego dostawcę surowców dla nowej generacji zrównoważonych materiałów budowlanych.

Consequently, the actual emissions balance of lime-based products should account not only for emissions generated during their production, but also for their potential to re-bind carbon dioxide during use. From a broader perspective, the development of accelerated carbonation and carbon dioxide mineralisation technologies may become one of the elements of the transformation of the lime sector towards a low-emission economy.

At the same time, the energy and climate transition of the lime industry should not be perceived solely as a threat associated with increasing costs of emissions, energy, and technological investment. It also represents an opportunity to change the structure of mineral raw materials used and to develop new low-emission construction materials. Of particular importance in this respect may be limestone powders produced by mechanically crushing and grinding limestone, which do not require a calcination process.

Unlike quicklime, limestone powder remains a carbonate material and does not require the decomposition of calcium carbonate with the release of carbon dioxide during production. Its use as a mineral addition therefore makes it possible to utilise the properties of limestone raw material without generating the process emissions characteristic of CaO production. In this respect, appropriately designed limestone powders can constitute a genuinely low-carbon mineral raw material, rather than merely a material with a reduced carbon footprint resulting from improved energy efficiency.

This perspective is particularly relevant to concrete technologies and walling materials. Partial replacement of high-emission constituents with non-calcined limestone materials may lead to reduced consumption of clinker and other constituents requiring high-temperature processing. At the same time, the availability of limestone deposits in Poland, well-developed extraction infrastructure, and the existing industrial base of the lime sector provide potential conditions for increasing the use of such raw materials in the domestic construction materials sector.

In this context, the transformation of the lime industry should be regarded not only as a process of decarbonising existing lime production technologies, but also as a broader transformation of the model for the use of lime-based raw materials. On the one hand, this transformation involves reducing emissions associated with the production of quicklime and hydrated lime, developing technologies for carbon dioxide capture and mineralisation, and increasing the contribution of recarbonation. On the other hand, it involves increasing the use of raw materials that can be applied without prior calcination.

A transformation understood in this way may become an important element in the development of a low- and zero-carbon value chain for walling materials. The transition from a model based primarily on calcined materials to one that makes greater use of uncalcined raw materials, complemented by technologies for carbon dioxide capture and permanent binding, makes it possible to view the lime industry not only as a source of emissions, but also as a potential supplier of raw materials for a new generation of sustainable construction materials.

Celem niniejszego artykułu jest analiza wyzwań stojących przed przemysłem wapienniczym w Polsce w kontekście transformacji energetycznej i klimatycznej oraz przedstawienie możliwości wykorzystania surowców wapiennych w rozwoju zrównoważonych materiałów ściennych. Skupiono się szczególnie na znaczeniu emisji procesowych, możliwościach dekarbonizacji produkcji wapna, potencjale rekarbonatyzacji oraz zastosowaniu niekalcy-nowanych mączek wapiennych jako niskoemisyjnych dodatków mineralnych do betonów.

2. Sektor wapienniczy

2.1. Zastosowanie produktów wapienniczych

Przemysł wapienniczy odpowiada za produkcję towarów wykorzystywanych w szerokim spektrum sektorów gospodarki. Zgodnie z informacjami publikowanymi przez Europejskie Stowarzyszenie Wapiennicze [European Lime Association, EuLA] zużycie produktów sektora wapienniczego w Unii Europejskiej wynosi w ostatnich latach 18,2 mln ton. Głównym odbiorcą produktów wapienniczych jest przemysł hutniczy odpowiadający za 40% popytu oraz branża budowlana odpowiadająca łącznie za 20% rynku [13% budownictwo, 7% infrastruktura]. Innymi konsumentami produktów wapienniczych są również sektor ochrony środowiska, przemysł chemiczny, papierowy oraz rolnictwo.

Również w Polsce największy udział w strukturze krajowego zużycia, przypada na hutnictwo, przemysł budowlany oraz chemiczny. Produkcja wapna, będącego niezbędnym surowcem dla wielu procesów przemysłowych, odpowiada za znaczącą część krajowego zużycia kamienia wapiennego w Polsce. Należy tutaj zaznaczyć, że w przypadku dużych producentów przemysłu chemicznego, hutniczego i papierniczego wapno produkowane jest w oparciu o procesy międzyoperacyjne, w obiegu zamkniętym [bilans masy i energii], przez co wielkość produkcji wapna nie jest wliczana do bilansu produkcji krajowej, a dalej europejskiej. Podobną ilość wapienia wykorzystuje się w formie mączek wapiennych, które pełnią kluczową rolę w ochronie środowiska np. jako sorbenty wykorzystywane do odsiarczania gazów spalinowych.

Wapno i produkty wapienne wykorzystywane są w kilku podstawowych formach, które znajdują zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Przemysł hutniczy i chemiczny wykorzystują głównie wapno w postaci wapna palonego oraz wapna dolomitowego. W celach ochrony środowiska wykorzystywane jest przeważnie wapno w postaci wapna gaszonego czyli wodorotlenku wapnia, mleka wapiennego i mączek wapiennych. Wapno gaszone, jak też mleko wapienne są surowcami wyko-

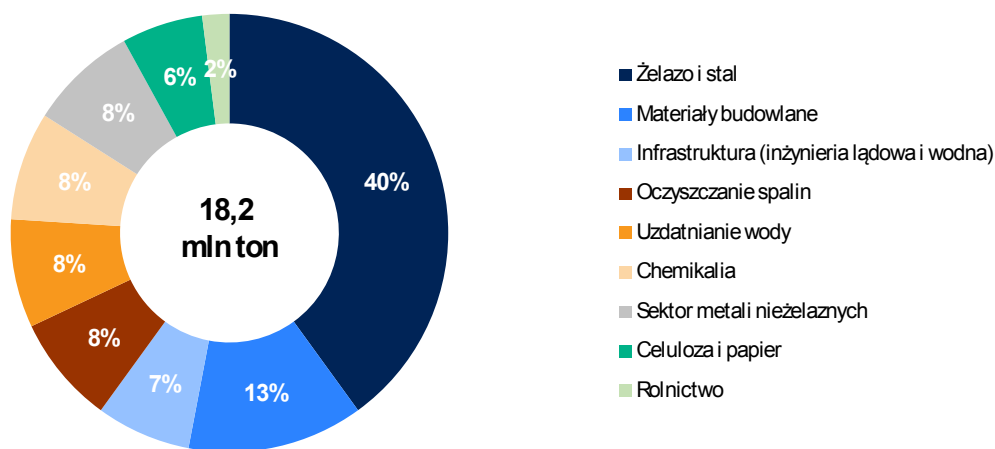
The aim of this paper is to analyse the challenges facing the lime industry in Poland in the context of the energy and climate transition and to present the potential for using lime-based raw materials in the development of sustainable walling materials. Particular attention is paid to the importance of process emissions, the potential for decarbonising lime production, the role of recarbonation, and the use of uncalcined limestone powders as low-carbon mineral additions to concrete.

2. The lime sector

2.1. Applications of lime products

The lime industry is responsible for the production of materials used across a wide range of economic sectors. According to information published by the European Lime Association [EuLA], annual consumption of lime-sector products in the European Union has amounted to 18.2 million tonnes in recent years. The main consumer of lime products is the steel industry, accounting for 40 % of demand, followed by the construction sector, which accounts for a total of 20 % of the market [13 % buildings, 7 % infrastructure]. Other consumers of lime products include the environmental protection sector, the chemical and paper industries, and agriculture.

Also in Poland, the largest shares of domestic consumption are accounted for by the steel, construction and chemical industries. The production of lime, which is an essential raw material for numerous industrial processes, represents a significant share of domestic limestone consumption in Poland. It should be noted that, in the case of large producers in the chemical, steel and paper industries, lime is produced as part of inter-process operations within a closed-loop system [mass and energy balance]. Consequently, the volume of lime produced is not included in the domestic production balance and, subsequently, in the European production balance. A comparable quantity of limestone is used in the form of limestone powders, which play a key role in environmental protection, for example as sorbents used for flue gas desulphurisation.



Rys. 1. Struktura wykorzystania produktów wapienniczych [opracowanie własne na podstawie danych European Lime Association].

Fig. 1. Structure of lime product utilisation [own elaboration based on data from the European Lime Association].

rzystywanymi również szeroko w przemyśle spożywczym. Węglan wapnia ma najszerszy zakres zastosowań spośród produktów wapienniczych i jest wykorzystywany między innymi w rolnictwie, przemyśle szklarskim i chemicznym.

2.2. Zastosowanie produktów wapienniczych w przemyśle

Produkty wapiennicze są jednym z najbardziej wszechstronnych i strategicznych surowców wykorzystywanych w przemyśle. Dzięki swoim właściwościom chemicznym i fizycznym znajduje zastosowanie w procesach produkcyjnych i środowiskowych. Kluczowe branże korzystające z produktów wapienniczych to przemysł hutniczy, chemiczny, szklarski, materiałów ogniotrwałych, gumowy, kosmetyczny oraz spożywczy.

2.2.1. Hutnictwo

W sektorze hutniczym produkty wapiennicze znajduje zastosowanie niemal na każdym etapie wytopienia stali. Wapno palone w postaci tlenku wapnia w trakcie procesu wytopu stali wykorzystywane jest w procesie usuwania zanieczyszczeń i wiązania ich w żużlu. Tlenek wapnia wchodzi w reakcję chemiczną między innymi z siarką oraz fosforem, wiążąc je i ułatwiając ich usunięcie. Proces ten umożliwia otrzymanie stali o większej czystości, lepszej plastyczności i wytrzymałości mechanicznej. Wapno jest również wykorzystywane do przygotowania surowki hutniczej oraz produkcji aglomeratu, gdzie poprawia właściwości fizykochemiczne materiałów wsadowych. Innym zastosowaniem wapnia w przemyśle hutniczym jest wykorzystanie go do ochrony wyłożyń ogniotrwałych pieców. Zastosowanie wapnia pozwala ograniczyć rozpuszczanie wyłożenia pieca, zwiększając tym samym jego trwałość. CaO pozwala również na zwiększenie odporności wyłożyń pieców hutniczych na szoki temperaturowe.

2.2.2. Przemysł chemiczny

Przemysł chemiczny, ze względu na swoją wszechstronność, korzysta ze wszystkich form materiałów wapienniczych. Ich zastosowanie obejmuje m.in.: produkcję związków chemicznych, gdzie wapno wykorzystywane jest w procesie syntezy związków chemicznych wykorzystywanych przez inne gałęzie przemysłu, takie jak przemysł spożywczy czy kosmetyczny. Może ono być wykorzystane także na potrzeby regulowania pH, przede wszystkim – jego podnoszenia, a więc zwiększania zasadowości płynów, ale także znajduje ono zastosowanie w procesie oczyszczania spalin.

Dzięki swoim właściwościom alkalizującym umożliwia skuteczne ograniczenie emisji związków szkodliwych, wspierając tym samym zgodność procesów przemysłowych z regulacjami środowiskowymi. Stwarza to szczególnie istotną szansę rozwoju sektora, jak również może wpłynąć na dalsze zwiększanie jego strategicznego znaczenia, w szczególności mając na uwadze rosnące ambicje w zakresie ograniczania emisji szkodliwych substancji przez przemysł, jak również rosnące zainteresowanie sektora finansowego realizowaniem inwestycji w przedsięwzięcia o mniejszym śladzie środowiskowym.

Lime and lime products are used in several basic forms, each finding applications in different branches of industry. The steel and chemical industries primarily use lime in the form of quicklime and dolomitic lime. In environmental protection, lime is mainly used in the form of hydrated lime, i.e. calcium hydroxide, lime milk and limestone powders. Hydrated lime and lime milk are also widely used as raw materials in the food industry. Calcium carbonate has the broadest range of applications among lime products, including in agriculture, glass manufacturing and the chemical industry.

2.2. Applications of lime products in industry

Lime is one of the most versatile and strategically important raw materials used in industry. Owing to its chemical and physical properties, it is used in both manufacturing and environmental processes. Key industries using lime include the steel, chemical, glass, refractory materials, rubber, cosmetics and food industries.

2.2.1. Steel industry

In the steel sector, lime is used at almost every stage of steelmaking. Quicklime, in the form of calcium oxide, is used during steel production to remove impurities and bind them into slag. Calcium oxide reacts chemically with, among other substances, sulphur and phosphorus, binding them and facilitating their removal. This process enables the production of steel with greater purity, improved ductility and higher mechanical strength. Lime is also used in the preparation of pig iron and in sinter production, where it improves the physicochemical properties of the feed materials. Another application of lime in the steel industry is the protection of refractory furnace linings. The use of lime reduces the dissolution of the furnace lining, thereby extending its service life. The use of CaO also increases the resistance of metallurgical furnace linings to thermal shock.

2.2.2. Chemical industry

Owing to its versatility, the chemical industry makes use of all forms of lime products. Their applications include, among others, the production of chemical compounds, in which lime is used in the synthesis of compounds subsequently employed by other industries, such as the food and cosmetics industries. Lime can also be used for pH regulation, primarily to increase pH and thus the alkalinity of liquids, and is also applied in flue gas treatment processes.

Owing to its alkalising properties, lime enables the effective reduction of emissions of harmful compounds, thereby supporting compliance of industrial processes with environmental regulations. This creates a particularly important opportunity for the development of the sector and may further enhance its strategic importance, especially in view of growing ambitions to reduce emissions of harmful industrial substances and the increasing interest of the financial sector in investing in projects with a lower environmental footprint.

2.2.3. Glass industry

Lime, typically in the form of calcium carbonate, is added to a mixture of raw materials such as quartz sand [SiO₂] and soda ash

2.2.3. Przemysł szklarski

Wapno, zazwyczaj w postaci węglanu wapnia, jest dodawane do mieszaniny surowców, takich jak piasek kwarcowy [SiO_2] i soda [Na_2CO_3], które są głównymi składnikami szkła. Dzięki obecności wapna szkło staje się bardziej trwałe i stabilne, co czyni je odpowiednim materiałem do produkcji szyb, butelek czy innych przedmiotów codziennego użytku zawierających szkło. Wapno wpływa również na poprawę właściwości termicznych szkła. Innym istotnym aspektem jest efektywność procesu produkcji szkła. Węglan wapnia, podczas ogrzewania w piecu szklarskim, ulega rozkładowi termicznemu, wydzielając dwutlenek węgla i pozostawiając tlenek wapnia. Ten proces wspomaga topienie mieszaniny surowców, obniżając temperaturę topnienia i skracając czas produkcji, co przekłada się na obniżenie kosztów energetycznych w zakładach szklarskich.

2.3. Zastosowanie produktów wapienniczych w budownictwie

Sektor budownictwa jest drugim największym konsumentem produktów wapienniczych, a samo wapno jest jednym z najstarszych materiałów stosowanych w tej dziedzinie. W sektorze budowlanym wapno jest wykorzystywane do produkcji zapraw murarskich i tynkarskich, betonów oraz innych produktów wykorzystywanych w tym sektorze. Jego właściwości, takie jak zdolność do wiązania CO_2 , regulacji wilgotności i oraz zapewniania dużej przepuszczalności pary wodnej, czynią go cennym składnikiem zarówno w tradycyjnych, jak i nowoczesnych technologiach budowlanych.

2.3.1. Wyroby silikatowe

Wapno jest kluczowym składnikiem w produkcji silikatów, takich jak cegły, bloczki i płyty. W połączeniu z piaskiem kwarcowym i wodą, pod wpływem podwyższonej temperatury i ciśnienia w autoklawach, tworzy trwałe struktury uwodnionych krzemianów wapnia. Wyroby silikatowe cechuje wysoka wytrzymałość, ognioodporność i korzystne właściwości izolacyjne. Podstawowym zadaniem wapna w procesie produkcji silikatów jest udział w reakcji chemicznej z krzemionką zawartą w piasku, podczas której powstają uwodnione krzemiany wapnia nadające silikatom charakterystyczną wytrzymałość, pojemność cieplną i izolacyjność akustyczną.

2.3.2. Autoklawizowany beton komórkowy

Podobnie jak w przypadku cegły silikatowej wapno stanowi nieodzowny element produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego. Ponownie wapno jest tutaj stosowane jako nieorganiczny materiał wiążący, jednak ze względu na inną specyfikę samego materiału – jego porowatość zamkniętą oraz właściwości izolacyjne, sposób aplikacji oraz sama charakterystyka stosowanego wapna różnią się od tego w silikatach. W przypadku betonu komórkowego kruszywo – piasek kwarcowy ulega rozdrobnieniu i aktywacji mechanicznej poprzez przemielenie w młynach mokrych. Dodatkowo w zamiarze surowcowym występują cementy powszechnego użytku oraz czynnik porujący, zazwyczaj w postaci pasty lub proszku glinowego. Ze względu na etap wyrastania i twardnienia masy,

[Na_2CO_3], which are the main constituents of glass. The presence of lime improves the durability and stability of glass, making it suitable for the production of window panes, bottles and other everyday glass products. Lime also contributes to improving the thermal properties of glass.

Another important aspect is the efficiency of the glass production process. When heated in a glass furnace, calcium carbonate undergoes thermal decomposition, releasing carbon dioxide and leaving calcium oxide. This process facilitates the melting of the raw material mixture by lowering the melting temperature and shortening the production time, thereby reducing energy costs in glass manufacturing plants.

2.3. Applications of lime products in construction

The construction sector is the second-largest consumer of lime products, while lime itself is one of the oldest materials used in this field. In the construction sector, lime is used in the production of masonry and rendering mortars, concretes, and other products used in construction. Its properties, such as the ability to bind CO_2 , regulate moisture, and provide high water vapour permeability, make it a valuable constituent of both traditional and modern construction technologies.

2.3.1. Sand-lime bricks

Lime is a key constituent in the production of calcium silicate products, such as bricks, blocks and boards. When combined with quartz sand and water and subjected to elevated temperature and pressure in autoclaves, it forms durable structures of calcium silicate hydrates. Calcium silicate products are characterised by high strength, fire resistance and favourable insulating properties. The primary role of lime in the production of calcium silicate products is its participation in the chemical reaction with silica contained in the sand, during which calcium silicate hydrates are formed, imparting the characteristic strength, thermal capacity and acoustic insulation properties to calcium silicate products.

2.3.2. Autoclaved aerated concrete

As in the case of calcium silicate bricks, lime is an indispensable component in the production of autoclaved aerated concrete. In this case, lime is again used as an inorganic binder; however, owing to the different characteristics of the material itself – including its closed porosity and insulating properties – both the method of application and the characteristics of the lime used differ from those of calcium silicate products. In the production of autoclaved aerated concrete, the aggregate – quartz sand – is subjected to size reduction and mechanical activation by wet grinding in mills. In addition, the raw material mix contains common cements and a pore-forming agent, typically in the form of an aluminium paste or powder.

Owing to the stages of expansion and hardening of the mix, limes with a lower rate of temperature increase [lower reactivity] are used. This allows the mix to expand more gradually, while hardening is not accompanied by settlement of the mix.

stosuje się wapna o mniejszej dynamice narastania temperatury [niższej reaktywności], dzięki czemu wyrastanie masy następuje łagodniej, a twardnieniu nie towarzyszy zjawisko osiadania masy.

Zarówno w przypadku cegły silikatowej, jak i betonu komórkowego, zawartość wapna wpływa korzystnie na warunki środowiskowe budowanych obiektów. Naturalnie zasadowy charakter wapna ogranicza bowiem rozwój znacznej części szkodliwych dla człowieka mikroorganizmów.

2.3.3. Zaprawy murarskie i tynkarskie

Wapno hydratyzowane $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ stanowi podstawowy składnik wapiennych oraz cementowo-wapiennych zapraw murarskich i tynkarskich. Poprawia plastyczność i urabialność mieszanki, ułatwia jej nakładanie oraz zapewnia lepszą przyczepność do podłoża. Zaprawy wapienne charakteryzują się wydłużonym czasem wiązania, co umożliwia precyzyjne prowadzenie prac.

W przypadku tynków, wapno reguluje wilgotność i poprawia mikroklimat wnętrz – ściany „oddychają”, a struktura tynku jest odporna na wilgoć i stabilna chemicznie dzięki procesowi karbonatyzacji. Wapno jest również niezastąpione w pracach konserwatorskich – jego naturalny skład i zgodność z historycznymi technologiami sprawiają, że jest podstawowym materiałem używanym przy renowacji zabytków. Dodatkowo, proces karbonatyzacji umożliwia samoistne uszczelnianie mikropęknięć, poprawiając trwałość konstrukcji.

2.3.4. Betony

Zastosowanie produktów wapienniczych w betonach staje się coraz bardziej popularne. Kruszywo wapienne było od wielu lat powszechnie stosowane w lokalnych zastosowaniach betonowych, jednakże od ponad dekady jest ono stosowane również w bardziej wymagających aplikacjach, w tym w betonach mostowych. Wynika to ze zmiany nastawienia do kruszyw węglanowych, które udało się osiągnąć serią rzetelnych i sprawdzonych badań i analiz potwierdzających zasadność stosowania wapienia w przypadku spełnienia wymagań jakościowych oraz odporności na reakcję z alkaliem i dedolomityzację.

Obecnie podobne prace są prowadzone w związku z możliwością a czasami wręcz koniecznością zastosowania mączek kamienia wapiennego w betonach, w szczególności w betonach samozagęszczalnych. Polski rynek betonów od lat stosuje z sukcesami popioły lotne ze spalania węgla. Jakość popiołów dostępnych na rynku ulega zmianom w związku ze zmianami stosowanych paliw jak również sposobem prowadzenia procesu spalania w energetyce. Co więcej, transformacja energetyczna wymusza zmiany w obecnym miksie energetycznym powodując okresowe zmiany w dostępności dobrej jakości popiołów.

Mechanizmy działania mączki wapiennej w betonie są dobrze udokumentowane. Drobne cząstki CaCO_3 pełnią funkcję wypełniacza [mikrokruszywa] wypełniając pory między ziarnami cementu, poprawiając stopień upakowania i zmniejszając porowatość. Ponadto

In both calcium silicate bricks and autoclaved aerated concrete, the lime content has a beneficial effect on the environmental conditions within buildings. Its naturally alkaline character limits the growth of a significant proportion of microorganisms that are harmful to human health.

2.3.3. Masonry and rendering mortars

Hydrated lime $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ is a basic constituent of lime and cement–lime masonry and rendering mortars. It improves the plasticity and workability of the mix, facilitates its application, and provides better adhesion to substrates. Lime mortars are characterised by an extended setting time, which enables precise execution of masonry and rendering works.

In renders, lime regulates moisture and improves the indoor microclimate by providing walls with higher water vapour permeability, while the render structure is resistant to moisture and chemically stable owing to the carbonation process. Lime is also indispensable in conservation work – its natural composition and compatibility with historical technologies make it a basic material used in the renovation of historic buildings. In addition, the carbonation process enables the spontaneous sealing of microcracks, thereby improving the durability of structures.

2.3.4. Concrete

The use of lime products in concrete is becoming increasingly common. Limestone aggregate has been widely used for many years in local concrete applications; however, for more than a decade it has also been used in more demanding applications, including concrete for bridge structures. This has resulted from a change in the perception of carbonate aggregates, supported by a series of reliable and validated studies and analyses confirming the suitability of limestone for applications where the required quality criteria are met, including resistance to alkali–aggregate reaction and dedolomitisation.

Similar research is currently being conducted on the possibility, and in some cases even the necessity, of using limestone powder in concrete, particularly self-compacting concrete. The Polish concrete industry has successfully used coal combustion fly ash for many years. The quality of fly ash available on the market is changing as a result of changes in the fuels used and in combustion processes in the power sector. Moreover, the energy transition is driving changes in the current energy mix, resulting in periodic changes in the availability of good-quality fly ash.

The mechanisms governing the action of limestone powder in concrete are well documented. Fine CaCO_3 particles act as a filler [microaggregate], filling the voids between cement grains, improving particle packing and reducing porosity. In addition, the surface of limestone powder particles provides sites that facilitate nucleation, i.e. the formation of crystal nuclei of hydration products, primarily the C–S–H phase, thereby accelerating the setting and hardening of cement.

powierzchnia ziaren mączki wapiennej stanowi powierzchnię, na której ułatwione jest zarodkowanie, czyli tworzenie się zarodków krystalizacji produktów hydratacji, głównie fazy C–S–H, co przyspiesza proces wiązania i twardnienia cementu.

Mączki wapienne, pozbawione aktywności pucolanowej i hydraulicznej, kwalifikują się jako dodatki typu I. Ich przydatność ocenia się według wymagań dla kruszywa wypełniającego, zgodnie z PN-EN 12620. Zgodnie z definicją, kruszywo wypełniające to frakcja, której większość przechodzi przez sito o oczku 0,063 mm, i która wpływa na właściwości materiałów budowlanych. Istotne jest, by nie utożsamiać tych produktów z pyłami, które są jedynie podzbiorem tej kategorii.

Zaproponowana przez branżę wapienniczą alternatywa w postaci mączek kamienia wapiennego stanowi potencjalne rozwiązanie odpowiadające na potrzeby branży betonowej. Podobnie jak w przypadku kruszyw węglanowych, mączki wapienne powinny zostać poddane badaniom przydatności oraz ich wpływu na stosowaną aplikację. Takie badania były i są prowadzone przez liczne jednostki badawcze, między innymi: Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji, Politechnikę Rzeszowską, Akademię Górniczo-Hutniczą i inne.

2.4. Zastosowanie produktów wapienniczych w ochronie środowiska

Wapno jest ważnym składnikiem w działaniach proekologicznych, wspierając ochronę wód, powietrza i gleby. Właściwości wapna znajdują powszechne zastosowanie w procesie uzdatniania wody oraz oczyszczania ścieków – zarówno przemysłowych, jak i komunalnych.

2.4.1. Uzdatnianie wody

W procesie uzdatniania wody wapno może być wykorzystane jako środek neutralizujący i oczyszczający. Dodatek wapna pozwala na regulację pH wody, usuwanie zanieczyszczeń chemicznych, takich jak metale ciężkie czy fosforany, a także wspiera proces koagulacji, w którym drobne cząstki zanieczyszczeń w wodzie łączą się w większe skupiska – ułatwiając ich usunięcie.

2.4.2. Oczyszczanie ścieków i neutralizacja osadów

Podobne właściwości wapna są wykorzystywane w oczyszczaniu ścieków, gdzie odgrywa ono rolę w procesach chemicznego i biologicznego usuwania zanieczyszczeń. Wapno jest stosowane do neutralizacji kwaśnych ścieków przemysłowych, stabilizując ich pH oraz eliminując toksyczne substancje. Stabilizowane osady mogą być wykorzystane później jako nawóz lub materiał do rekultywacji terenów. W procesach biologicznych wapno wspiera rozwój mikroorganizmów odpowiedzialnych za rozkładanie materii organicznej, przyspieszając oczyszczanie ścieków.

2.4.3. Oczyszczanie gazów spalinowych

Wapno pełni również funkcję w procesach oczyszczania gazów spalinowych. Dodatek wapna – najczęściej w formie tlenku wapnia [CaO] lub wodorotlenku wapnia [Ca(OH)₂] – pozwala na skuteczne

Limestone powders, which exhibit neither pozzolanic nor hydraulic activity, are classified as Type I additions. Their suitability is assessed according to the requirements for filler aggregate specified in PN-EN 12620. According to the definition, filler aggregate is a fraction in which the majority of particles pass through a 0.063 mm sieve and which influences the properties of construction materials. It is important not to equate these products with dust, which represents only a subset of this category.

Limestone powders proposed by the lime industry represent a viable option for addressing the needs of the concrete industry. As in the case of carbonate aggregates, limestone powders should undergo testing to assess their suitability and their effect on the intended application. Such studies have been and continue to be conducted by numerous research institutions, including the Building Technology Centre – Institute of Research and Certification, Rzeszów University of Technology, AGH University of Kraków, and others.

2.4. Applications of lime products in environmental protection

Lime is an important component of environmental protection measures, supporting the protection of water, air and soil. The properties of lime are widely utilised in water treatment and wastewater treatment, both industrial and municipal.

2.4.1. Water treatment

In water treatment processes, lime can be used as a neutralising and purifying agent. The addition of lime enables water pH to be regulated and chemical contaminants, such as heavy metals and phosphates, to be removed, while also supporting the coagulation process.

2.4.2. Wastewater treatment and sludge stabilisation

Similar properties of lime are utilised in wastewater treatment, where it plays a role in chemical and biological contaminant removal processes. Lime is used to neutralise acidic industrial wastewater, stabilising its pH and eliminating toxic substances. The stabilised sludge can subsequently be used as a fertiliser or as a material for land reclamation. In biological processes, lime supports the development of microorganisms responsible for the decomposition of organic matter, thereby accelerating wastewater treatment.

2.4.3. Flue gas treatment

Lime also plays an important role in flue gas treatment processes. The addition of lime – most commonly in the form of calcium oxide [CaO] or calcium hydroxide [Ca(OH)₂] – enables the effective removal of harmful substances, such as sulphur dioxide [SO₂] and nitrogen oxides [NO_x], through their chemical binding.

2.5. Applications of lime products in agriculture

Lime is widely used in agriculture. It is primarily applied to reduce soil acidity, improve soil structure and increase the availability of nutrients to plants. Its versatility and chemical properties make

usuwanie szkodliwych substancji, takich jak dwutlenek siarki [SO₂] czy tlenki azotu [NO_x], poprzez ich chemiczne wiązanie.

2.5. Zastosowanie produktów wapienniczych w rolnictwie

Wapno znajduje szerokie zastosowanie w rolnictwie. Stosuje się je głównie do odkwaszania gleb, poprawiania ich struktury i zwiększania dostępności składników odżywczych dla roślin. Jego wszechstronność i właściwości chemiczne czynią wapno niezastąpionym surowcem, który wspiera zarówno wzrost plonów, jak i produkcję żywności o wysokiej jakości.

Wapno – głównie w postaci nawozów wapniowych i wapniowo-magnezowych – stosowane jest do odkwaszania gleb, poprawiając ich strukturę i zwiększając przyswajalność składników odżywczych, takich jak fosfor, azot czy magnez. Utrzymanie optymalnego pH gleby jest istotne dla prawidłowego wzrostu roślin. Magnez zawarty w nawozach wapniowo-magnezowych wspiera fotosyntezę jako kluczowy składnik chlorofilu. W produkcji nawozów sztucznych wapno pełni funkcję stabilizatora i neutralizatora, który poprawia właściwości fizykochemiczne produktów końcowych. Wapno hydratyzowane [Ca(OH)₂] jest używane do regulacji poziomu kwasowości podczas syntezy nawozów, co pozwala na uzyskanie optymalnych warunków reakcji chemicznych oraz właściwego pH dla roślin. Ponadto wapno jest stosowane jako wypełniacz w nawozach granulowanych, który ułatwia ich aplikację na polu oraz poprawia trwałość granuliek.

3. Przemysł wapienniczy na tle innych sektorów – perspektywy dekarbonizacji

Dekarbonizacja przemysłu, szczególnie w sektorach trudnych do dekarbonizacji [ang. hard-to-abate sectors], stanowi obecnie jedno z największych wyzwań polityki energetyczno-klimatycznej. Wspomniane sektory obejmują branże, które ze względu na swoją specyfikę technologiczną, miks energetyczny i wysoką energochłonność generują znaczne emisje gazów cieplarnianych, a których redukcja wiąże się z licznymi wyzwaniami. Do najważniejszych sektorów trudnych do dekarbonizacji należą przemysł cementowy, stalowy, chemiczny czy wapienniczy.

Przemysł wapienniczy generuje emisje CO₂ zarówno w wyniku spalania paliw kopalnych, jak i procesów chemicznych, takich jak kalcynacja węglanu wapnia. Proces ten prowadzi do powstania tlenku wapnia i uwolnienia dwutlenku węgla jako produktu ubocznego. Globalnie sektor ten odpowiada za około 7% emisji z przemysłu. Z kolei w Unii Europejskiej odpowiada on za ok. 4% emisji objętych systemem EU ETS. W Polsce emisje z przemysłu wapienniczego są również istotne i w 2024 r. wyniosły około 1 600 tys. ton dwutlenku węgla tj. ok. 1% emisji Polski z instalacji stacjonarnych i lotnictwa.

Struktura emisji przemysłu wapienniczego obejmuje zarówno emisje procesowe, które stanowią około 60% całkowitych emisji, jak i emisje związane ze spalaniem paliw kopalnych w piecach

limy an indispensable raw material that supports both crop yields and the production of high-quality food.

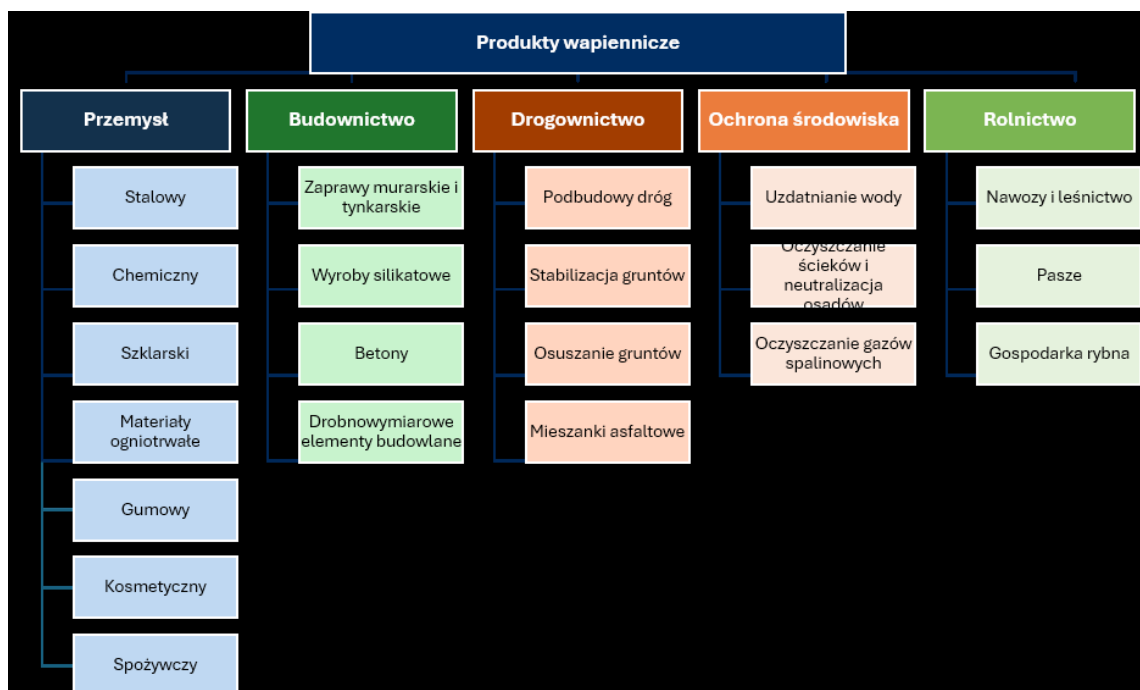
Lime – mainly in the form of calcium and calcium–magnesium fertilisers – is used to reduce soil acidity, improve soil structure and increase the availability of nutrients such as phosphorus, nitrogen and magnesium. Maintaining an optimum soil pH is essential for proper plant growth. Magnesium contained in calcium–magnesium fertilisers supports photosynthesis as a key constituent of chlorophyll. In the production of mineral fertilisers, lime acts as a stabiliser and neutralising agent, improving the physicochemical properties of the final products. Hydrated lime [Ca(OH)₂] is used to regulate acidity during fertiliser synthesis, enabling optimum conditions for chemical reactions and an appropriate pH for plants to be achieved. In addition, lime is used as a filler in granulated fertilisers, facilitating their application in the field and improving the durability of the granules.

3. The lime industry in the context of other sectors – decarbonisation prospects

Industrial decarbonisation, particularly in hard-to-abate sectors, is currently one of the major challenges of energy and climate policy. These sectors include industries which, owing to their specific technological processes, energy mix and high energy intensity, generate significant greenhouse gas emissions, while their reduction presents numerous challenges. The key hard-to-decarbonise sectors include the cement, steel, chemical and lime industries.

The lime industry generates CO₂ emissions both from the combustion of fossil fuels and from chemical processes such as calcium carbonate calcination. This process results in the formation of calcium oxide and the release of carbon dioxide as a by-product. Globally, the sector accounts for approximately 7 % of industrial emissions. In the European Union, it accounts for approximately 4 % of emissions covered by the EU Emissions Trading System [EU ETS]. In Poland, emissions from the lime industry are also significant, amounting to approximately 1.6 million tonnes of carbon dioxide in 2024, i.e. approximately 1 % of Poland's emissions from stationary installations and aviation.

The emission profile of the lime industry comprises both process emissions, which account for approximately 60 % of total emissions, and emissions associated with the combustion of fossil fuels in lime kilns. One of the available emission reduction options is carbon capture and storage [CCS], which enables CO₂ released during lime production to be captured and subsequently transported to an underground storage site. At present, CCS remains the only available decarbonisation solution capable of reducing process emissions in the lime industry. However, implementation of this solution will require substantial capital investment and the involvement of other stakeholders, including other sectors that could potentially use CCS infrastructure, as well as government coordination, among other things, to define a strategy and development pathways for the technology in Poland, including the identification



Rys. 2. Schemat stosowania produktów wapienniczych.

Fig. 2. Schematic diagram of the application of lime products.

wapienniczych. Jednym z dostępnych rozwiązań redukcyjnych jest technologia wychwytywania i składowania dwutlenku węgla [CCS, z ang. Carbon Capture and Storage], która umożliwia wychwyt CO₂ uwalnianego podczas produkcji wapna i następnie transport do podziemnego miejsca składowania. Na chwilę obecną CCS pozostaje jedynym dostępnym rozwiązaniem dekarbonizacyjnym pozwalającym na ograniczenie emisji procesowych w przemyśle wapienniczym. Wdrożenie tego rozwiązania wiązać się będzie jednak ze znacznymi nakładami inwestycyjnymi oraz zaangażowaniem innych interesariuszy – pozostałych sektorów potencjalnie wykorzystujących infrastrukturę technologii CCS oraz koordynacji rządu m.in. w celu określenia strategii i kierunków rozwoju technologii w Polsce m.in. miejsc podziemnego składowania wychwyconego dwutlenku węgla oraz sposobów finansowania.

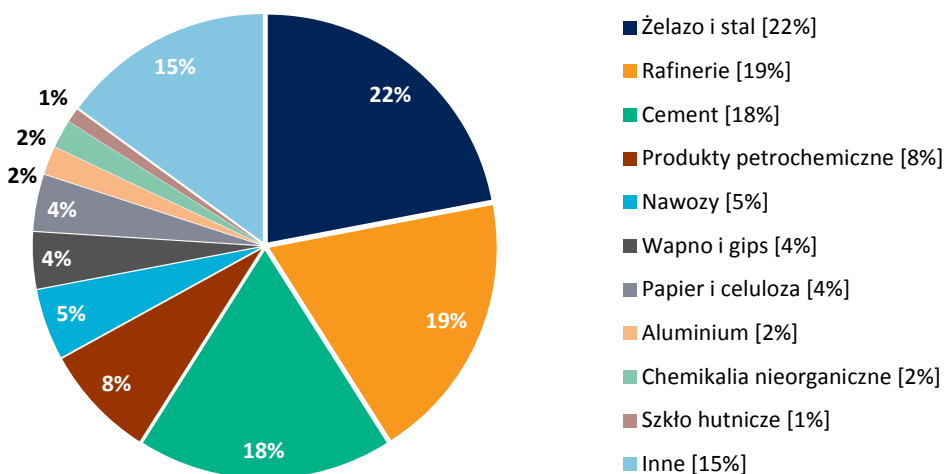
Z badania przeprowadzonego przez SPW wynika, że jedną z najefektywniejszych metod dla polskiego sektora wapienniczego byłoby połączenie spalania tlenowego [oxy-fuel] z wykorzystaniem paliwa gazowego. W założeniu dałoby to najniższy z rozważanych scenariuszy ślad węglowy na tonę wapna wynoszący poniżej 350 kg/t, jak też najniższy koszt w przeliczeniu na tonę produktu i tonę wychwyconego dwutlenku węgla. Jednak obecny stan techniki oraz możliwości przesyłu i składowania dwutlenku węgla nie są gotowe do komercjalizacji.

Warto też zwrócić uwagę, że wdrożenie CCS w Polsce wciąż oczekuje na szereg niezbędnych aktów prawnych jak m.in. rozporządzenie lokalizacyjne, które okre-

of sites for the underground storage of captured carbon dioxide and the mechanisms for financing such infrastructure.

A study conducted by the Polish Lime Association indicates that one of the most effective approaches for the Polish lime sector would be to combine oxy-fuel combustion with the use of gaseous fuel. This scenario would, in principle, result in the lowest carbon footprint among those considered, at below 350 kg/t of lime, as well as the lowest cost per tonne of product and per tonne of captured carbon dioxide. However, the current state of the technology, as well as the available carbon dioxide transport and storage infrastructure, is not yet ready for commercial deployment.

It is also worth noting that the implementation of CCS in Poland is still awaiting a number of necessary legislative acts, including a location regulation defining sites for the underground sequestration of carbon dioxide within Poland. Such a regulation is essential



Rys. 3. Udział emisji sektorowych w całkowitych emisjach przemysłowych CO₂ w Unii Europejskiej.

Fig. 3. Share of sectoral emissions in total industrial CO₂ emissions in the European Union.

śląłoby miejsca podziemnej sekwestracji dwutlenku węgla na terytorium Polski. Jest ono kluczowe dla rozpoczęcia inwestycji w projekty składowania, bez których projekty wychwyty z instalacji przemysłowych, czy w ramach klastrów są znacząco utrudnione i obarczone niepewnością. Wskazuje się też na potrzebę wdrożenia mechanizmu wsparcia np. w postaci węglowych kontraktów różnicowych.

Konkludując, dekarbonizacja sektora wapienniczego na tle innych sektorów przemysłu będzie w większym stopniu uzależniona od jednej kategorii technologii, a tym samym bardziej podatna na ryzyka polityczne czy społeczne. Dodatkowo technologie CCS są kapitałochłonne, co będzie stanowiło wyzwanie finansowe dla sektora szczególnie wobec braku jasnego mechanizmu wsparcia. Stąd specyfika transformacji sektora powinna być jasno komunikowana decydentom, by uznali oni konieczność podjęcia szybkich i zdecydowanych działań przyspieszających transformację.

4. Wapno jako sorbent dwutlenku węgla

Jednym z istotnych, a jednocześnie często niedostatecznie uwzględnianych aspektów środowiskowej oceny przemysłu wapienniczego jest zdolność produktów wapiennych do ponownego wiązania dwutlenku węgla. Proces ten określany jest jako karbonatyzacja wtórna lub rekarbonizacja wapna i stanowi naturalne odwrócenie reakcji dekarbonatyzacji zachodzącej podczas produkcji wapna. W procesie kalcynacji wapień ulega rozkładowi z wytworzeniem tlenku wapnia [równanie 1]. Natomiast w okresie użytkowania wapna reakcja może przebiegać w kierunku przeciwnym [równanie 2].

W przypadku wapna hydratyzowanego proces przebiega poprzez reakcję [3] wodorotlenku wapnia z dwutlenkiem węgla:



W konsekwencji produkt wapienny, który na etapie produkcji jest źródłem emisji procesowej, w dalszej części swojego cyklu życia staje się materiałem zdolnym do ponownego pochłaniania CO₂. Rekarbonizacja jest zatem szczególnym mechanizmem, w którym część węgla uwolnionego podczas produkcji może zostać ponownie związana w postaci stabilnego mineralnego węglanu wapnia. Proces ten jest termodynamicznie samorzutny i zachodzi spontanicznie, choć jego rzeczywista szybkość i stopień zaawansowania zależą od warunków środowiskowych oraz właściwości fizycznych produktu.

Z punktu widzenia bilansu klimatycznego oznacza to konieczność odejścia od uproszczonego postrzegania emisji przemysłu wapienniczego wyłącznie przez pryzmat emisji powstających w piecu wapienniczym. Ocena rzeczywistego wpływu klimatycznego powinna obejmować cały cykl życia produktu, w tym ilość CO₂ ponownie związanego w fazie jego użytkowania. W przeglądzie obejmującym różne zastosowania wapna oszacowano, że w warunkach rynku europejskiego około 23–33% emisji procesowych może zostać

for initiating investment in storage projects, without which carbon capture projects at industrial installations or within clusters face significant difficulties and uncertainty. There is also a recognised need to introduce a support mechanism, for example in the form of carbon contracts for difference.

In conclusion, compared with other industrial sectors, the decarbonisation of the lime sector will be more heavily dependent on a single category of technologies and will therefore be more vulnerable to political and social risks. In addition, CCS technologies are capital-intensive, which will present a financial challenge for the sector, particularly in the absence of a clear support mechanism. The specific nature of the sector's transition should therefore be clearly communicated to policymakers so that they recognise the need for prompt and decisive action to accelerate the transition.

4. Lime as a carbon dioxide sorbent

One of the important, yet frequently insufficiently considered, aspects of the environmental assessment of the lime industry is the ability of lime products to re-bind carbon dioxide. This process is referred to as secondary carbonation or recarbonation of lime and represents a natural reversal of the decarbonation reaction occurring during lime production. During calcination, limestone decomposes to form calcium oxide [Equation 1]. During the service life of lime, however, the reaction may proceed in the opposite direction [Equation 2].

In the case of hydrated lime, the process proceeds through the reaction [3] of calcium hydroxide with carbon dioxide:



Consequently, a lime product that is a source of process emissions at the production stage subsequently becomes a material capable of reabsorbing CO₂ during the later stages of its life cycle. Recarbonation is therefore a specific mechanism whereby part of the carbon released during production can be re-bound in the form of stable mineral calcium carbonate. The process is thermodynamically spontaneous and occurs naturally, although its actual rate and extent depend on environmental conditions and the physical properties of the product.

From the perspective of the climate balance, this means that it is necessary to move away from a simplified assessment of emissions from the lime industry based solely on emissions generated in the lime kiln. An assessment of the actual climate impact should encompass the entire product life cycle, including the amount of CO₂ re-bound during the use phase. A review covering various applications of lime estimated that, under European market conditions, approximately 23–33 % of process emissions could potentially be re-bound through natural carbonation over the entire service life of lime products.

A more recent analysis prepared for the European Lime Association (1) indicates that, across 14 major lime applications, approximately

ponownie związane w wyniku naturalnej karbonatyzacji w całym okresie użytkowania produktów wapiennych.

Nowsza analiza przygotowana dla European Lime Association (1) wskazuje, że w 14 głównych zastosowaniach wapna około 33% emisji procesowych może zostać ponownie pochłonięte już w pierwszym roku. Wynik ten pokazuje, że rekarbonizacja nie jest wyłącznie zjawiskiem zachodzącym w bardzo długiej perspektywie czasowej, lecz w określonych zastosowaniach może mieć znaczenie już na początku cyklu życia produktu. Jednocześnie tempo procesu jest silnie zależne od rodzaju zastosowania – w niektórych procesach, między innymi w uzdatnianiu wody, oczyszczaniu gazów spalinowych czy zastosowaniach w przemyśle celulozowo-papierniczym, kontakt wapna z CO₂ może prowadzić do bardzo szybkiej karbonatyzacji.

5. Podsumowanie

Sektor wapienniczy był i jest istotnym elementem gospodarki, który ze względu na swoją energochłonność będzie poddawany presji zmian w technologii produkcji i efektywności energetycznej. Ze względu na szeroki wachlarz zastosowań produktów wapienniczych zmiany te powinny uwzględniać wszystkie strony będące odbiorcami produktów oferowanych przez branżę. Zmiany korzystne dla jednego sektora nie mogą bowiem wpływać niekorzystnie na inne.

Szczególną uwagę należy zwrócić na przemysł budowlany, który podlega bardzo silnym naciskom dotyczącym obniżenia ogólnej emisyjności budynków w związku z planowanym rozszerzeniem systemu ETS. Produkty wapiennicze już teraz oferują możliwość obniżenia śladu węglowego poprzez zastosowanie mączek kamienia wapiennego, które w naturalny sposób posiadają mały ślad węglowy. W przypadku wapna palonego i hydratyzowanego istnieje wysoki potencjał ograniczenia obecnego poziomu emisji, w szczególności poprzez eliminację emisji paliwowej, a w perspektywie sprawnej implementacji składowania i przesyłu dwutlenku węgla, również procesowej.

Co więcej w perspektywie analizy całego cyklu życia produktów budowlanych należy uwzględnić naturalnie występujące procesy wtórnej karbonizacji produktów, które w znaczący sposób obniżają finalny ślad węglowy stosowanych materiałów budowlanych.

Literatura / References

1. Ch. Pape, O. Rueda et al., Carbon accounting of recarbonation in lime products. Main considerations for compliance and voluntary carbon markets. Report for European Lime Association. 2024.

33 % of process emissions can be reabsorbed as early as the first year. This result demonstrates that recarbonation is not solely a phenomenon occurring over very long time scales, but that, in certain applications, it may be significant already at the beginning of the product life cycle. At the same time, the rate of the process is strongly dependent on the type of application – in some processes, including water treatment, flue gas treatment and applications in the pulp and paper industry, contact between lime and CO₂ may result in very rapid carbonation.

5. Conclusions

The lime sector has been and remains an important component of the economy and, owing to its energy intensity, will be subject to increasing pressure to introduce changes in production technology and improve energy efficiency. Given the wide range of applications of lime products, these changes should take into account all sectors using products supplied by the industry. Measures that are beneficial to one sector must not adversely affect others.

Particular attention should be paid to the construction industry, which is subject to strong pressure to reduce the overall emissions associated with buildings in connection with the planned extension of the ETS. Lime products already offer opportunities to reduce the carbon footprint through the use of limestone powders, which inherently have a low carbon footprint as they do not require calcination. In the case of quicklime and hydrated lime, there is considerable potential to reduce current emission levels, particularly through the elimination of fuel-related emissions and, once carbon dioxide transport and storage infrastructure has been effectively implemented, process emissions as well.

Furthermore, when assessing the entire life cycle of construction products, naturally occurring secondary carbonation processes should be taken into account, as these can significantly reduce the final carbon footprint of the construction materials used.