

dr inż. Anna Stępień¹⁾
ORCID: 0000-0001-7937-8804

Application of a geochemical modeling code to the analysis of the phase composition of silicate bricks

Zastosowanie kodu modelowania geochemicznego do analizy składu fazowego cegieł silikatowych

DOI: 10.15199/33.2025.11.19

Abstract: This paper discusses glass recycling and the use of recycled glass in silicate bricks as a sustainable waste management option in construction. The proposed modification involved replacing quartz sand with recycled glass sand in the silicate mass at a rate of 10-90%, shortening of the autoclaving time, and using the GEMS-PSI software to analyze the phase composition and design of the bricks. Laboratory production involved the production of 5×5×5 cm blocks, and the production process replicated the industrial process.

Keywords: autoclaving; GEMS, sand; glass, recycle; over-production.

Streszczenie: Artykuł dotyczy recyklingu szkła, zastosowania recyklatu w ceglach silikatowych jako wariantu zrównoważonej gospodarki odpadami w budownictwie. Propozycja modyfikacji polegała na zastąpieniu piasku kwarcowego w masie silikatowej piaskiem szklanym z recyklingu w ilości 10–90%, skróceniu czasu autoklawizacji i zastosowaniu programu GEMS-PSI do analizy składu fazowego oraz projektowania cegieł. Produkcja laboratoryjna obejmowała wykonanie bloczków o wymiarach 5×5×5 cm, a proces produkcji był odwzorowaniem procesu w warunkach przemysłowych.

Słowa kluczowe: autoklawizacja; GEMS, piasek; szkło; recyklat; nadprodukcja.

Advancing civilizational and consumption changes, along with the desire to improve living standards, are generating changes in the human natural environment, affecting the landscape and environmental structure through construction. Building structures play a pivotal role in addressing the climate crisis and in the process of economic decarbonization. Current civilizational and construction-related challenges particularly concern three aspects: the shrinking resources of quartz sand SiO₂, widely used in various industrial sectors [1], excessive water consumption [2, 3], and the management of waste materials – including recycled glass cullet from colored bottles. The construction industry and residential building projects account for approximately 38% of global carbon dioxide emissions, with 10% resulting from the production and transportation of construction materials and the construction and demolition processes, and the remaining 28% occurring during the operational phase.

Construction projects lead to:

- architectural changes and alterations in landform (on one hand, aggregates are depleted, while on the other, new buildings emerge);
- climatic changes, including global warming, caused, among other factors, by industrial production;
- hydrogeological changes that determine the available resources of groundwater [4].

The engagement of a segment of society in improving the state of the environment is often met with misunderstanding.

Postępujące zmiany cywilizacyjne i konsumpcyjne oraz chęć podniesienia standardów bytowych generują zmiany w otoczeniu naturalnym człowieka, ingerując w krajobraz i strukturę środowiska przez budownictwo. Konstrukcje budowlane odgrywają kluczową rolę w reagowaniu na kryzys klimatyczny oraz w procesie dekarbonizacji gospodarki. Obecne problemy cywilizacyjno-budowlane dotyczą szczególnie trzech aspektów: kurczących się zasobów piasku kwarcowego SiO₂, który jest stosowany na szeroką skalę w różnych gałęziach przemysłu [1], nadmiernego wykorzystywania wody [2, 3] i utylizacji materiałów odpadowych – w tym stłuczki szklanej z recyklingu butelek kolorowych. Przemysł budowlany i realizacje budynków mieszkalnych są odpowiedzialne za ok. 38% światowej emisji dwutlenku węgla, a 10% emisji powstaje podczas produkcji i transportu materiałów budowlanych oraz procesu budowy i rozbiórki, natomiast kolejne 28% podczas eksploatacji [1]. Działalność człowieka i związane z tym przedsięwzięcia budowlane doprowadzają m.in. do:

- zmian architektonicznych i ukształtowania terenu (z jednej strony kruszyw ubywa, a z drugiej pojawiają się nowe zabudowania);
- zmian klimatycznych, w tym do ocieplania klimatu, spowodowanego m.in. produkcją przemysłową;
- zmian hydrogeologicznych ustalających zasoby dyspozycyjne wód podziemnych [4].

Zaangażowanie części społeczeństwa w poprawę stanu środowiska spotyka się często z niezrozumieniem. Zdarza się, że nowo powstałe obiekty stają się bezużyteczne z powodu nietrafionych inwestycji pod względem ekologicznym, gospodarczym i finansowym, jak np.:

¹⁾ Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Budownictwa i Architektury; a.stepien@tu.kielce.pl

It sometimes happens that newly constructed facilities become useless due to misguided investments from an ecological, economic, and financial perspective, such as:

- Palm Island, which serves as Dubai's main tourist attraction;
- the German protection system „bunker, ” which contains 936 bedrooms and 900 offices. The bunker was never used, and the costs incurred for its construction are estimated at approximately €3.5 billion;
- Hotel Ryugyŏng – \$750 million in North Korea;
- Żarnowiec Power Plant – \$2 billion and inefficiency [5].

One of the basic materials widely used in construction is quartz sand, used for production of artificial stone (concrete, bricks) and glass packaging, among other things. Due to its excessive use, substitute raw materials are sought. Consequently, the subject of the article concerns the issue of excessive extraction of natural aggregates (particularly SiO_2), the use of recycled material in the form of glass sand obtained from bottle recycling (green-colored), and the potential application of the GEMS-PSI program for designing and simulating laboratory-scale studies. Excessive sand extraction from rivers or seas has destructive effects and leads to the disruption of ecosystems, ultimately threatening the extinction of fish, turtles, and other marine animal species, as well as coral reefs [7, 8]. It is estimated that since 2008, up to 90% of the world's beaches have, on average, decreased by 40 meters, and by 2100, 67% of the beaches in Southern California are likely to disappear. By excessive use of sand reserves, humans also contribute to land erosion, floods and landslides [9, 10].

According to estimates by the Global Footprint Network, humans consume more resources than the Earth can naturally regenerate and emit more waste than the Earth can absorb naturally [11]. An environmentally friendly solution that can alleviate the strain on natural mineral resources is the recycling of glass products, especially since guidelines indicate the necessity of increasing the use of recycled materials in industry (sustainable waste management, closed-loop economy). In order to improve environmental conditions, methods for reducing CO_2 concentration in the atmosphere are being developed, one of which is the application of thermodynamic simulations already at the design stage, which reduces the number of experiments conducted as well as the substrates and energy used. G. Sant, together with colleagues from UCLA, developed a method based on the so-called closure of the CO_2 loop in the production of modern concretes. According to this method, the process of limestone decarbonization into calcium oxide (CaO) should be carried out while simultaneously capturing CO_2 [12, 13]. Data indicate that glass recycling in Europe is approximately 75%, while in the USA it is 26.6%, with the remainder being landfilled. Of the approximately 850,000 tons of glass packaging introduced to the market in 2001, only 140,000 tons were reprocessed. The remaining glass was not utilized [14, 15].

Materials and research method

The subject of the study was a sand-lime brick, produced under pressure at 200°C from quartz sand (90% SiO_2), lime (7% CaO), and water (3% H_2O). The proposed modification

- Wyspa Palma stanowiąca głównie atrakcję turystyczną Dubaju;

- niemiecki system ochrony „bunkier”, w którym znajduje się 936 sypialni i 900 biur. Bunkra nigdy nie użyto, a koszty poniesione na jego budowę szacuje się na ok. 3,5 mld euro;

- Hotel Ryugyŏng w Korei Północnej – 750 milionów dolarów;

- Elektrownia w Żarnowcu – 2 mld dolarów i brak efektywności [5].

Jednym z podstawowych materiałów stosowanych w budownictwie jest piasek kwarcowy, wykorzystywany m.in. do produkcji tzw. sztucznego kamienia (beton, cegły), czy opakowań szklanych. Ze względu na jego nadmierne wykorzystanie poszukiwane są surowce zamiennie. W związku z tym tematyka artykułu dotyczy zagadnienia nadmiernego wydobycia kruszyw naturalnych (szczególnie SiO_2), zastosowania recyklatu w postaci piasku szklanego z recyklingu butelek (o zabarwieniu zielonym) oraz możliwości zastosowania programu GEMS-PSI (Gibbs Energy Minimisation Software [6]) do projektowania i symulowania badań w skali laboratoryjnej. Nadmierne wydobywanie piasku z rzek czy mórz działa destrukcyjnie i prowadzi do zaburzenia ekosystemów, co w efekcie grozi ginieniem ryb, żółwi i innych gatunków zwierząt morskich czy raf koralowych [7, 8]. Szacuje się, że od 2008 r. nawet 90% plaż na świecie zmniejszyło się średnio o 40 m, a do 2100 r. 67% plaż południowej Kalifornii najprawdopodobniej zniknie [7]. Nadmiernym zużyciem rezerw piasku człowiek przyczynia się również do erozji ziemi, powodzi i osuwisk [9, 10].

Z szacunków Global Footprint Network wynika, że ludzie zużywają więcej zasobów, niż Ziemia jest w stanie odtworzyć w sposób naturalny i emitują więcej odpadów, niż Ziemia może wchłonąć w naturalny sposób [11]. Rozwiązaniem przyjaznym środowisku, które może odciążyć naturalne złoża surowców mineralnych, jest recykling wyrobów szklanych, szczególnie że wytyczne wskazują na konieczność zwiększania zużycia recyklatu w przemyśle (zrównoważona gospodarka odpadami, obieg zamknięty). W celu poprawy warunków środowiskowych opracowywane są sposoby ograniczenia stężenia CO_2 w atmosferze, a jednym z nich jest stosowanie symulacji termodynamicznych już na etapie projektowania, co zmniejsza liczbę wykonanych doświadczeń oraz stosowanych substratów i energii. G. Sant wraz z pracownikami z UCLA opracował metodę, której założeniem jest tzw. *zamknięcie pętli CO_2* podczas produkcji nowoczesnych betonów. W myśl tej metody należy przeprowadzić proces dekarbonizacji wapienia do postaci tlenku wapnia (CaO) przy jednoczesnym wychwyceniu CO_2 [12, 13]. Z danych wynika, że recykling szkła w Europie wynosi ok. 75%, a w USA – 26,6%, natomiast reszta jest składowana. Z wprowadzonych na rynek w 2001 r. ok. 850 tys. ton opakowań szklanych ponownie przetworzono tylko 140 tys. ton. Pozostałe szkło nie zostało zagospodarowane [14, 15].

Materiały i metoda badań

Przedmiotem badań była cegła wapienno-piaskowa, produkowana w temperaturze 200°C i pod ciśnieniem na bazie piasku kwarcowego (90% SiO_2), wapna (7% CaO) i wody

involved replacing the quartz sand „QS” by 10–90% recycled colored glass sand „GS”, shortening the autoclaving time to 5 hours, and using the GEMS-PSI software to analyze the phase composition and design of autoclaved bricks in the laboratory. Laboratory production involved the production of 5×5×5 cm blocks. A laboratory autoclave was used, and the brick production process replicated industrial production. The GEMS-PSI program [6, 16, 17] was used to conduct thermodynamic simulations to determine the degree of crystallization of calcium silicates hydrated in autoclaved bricks modified with GS glass sand. The GEMS-based phase composition analysis is based on the use of data from the Cemdata18 database, which was developed by Prof. B. Lothenbach and her colleagues at Empa for hydrated Portland cement, calcium aluminate, calcium sulfoaluminate, phosphate and mixed cements, as well as for alkali-activated materials. Cemdata18 contains thermodynamic data for common cement hydrates such as C-S-H, AFm and AFt phases, hydrogarnet, hydrotalcite, phosphates, zeolites and M-S-H, which are valid in the temperature range from 0 to at least 100°C. The use of the Cemdata18 database in GEMS codes also requires the use of the PSI/Nagra TDB database in the GEMS version (supplied with GEM-Selektor codes [6, 18, 19]). Silicate materials, due to the production process at a temperature of 200°C, eliminate the problem associated with crystallization, as aside from artificial heating of the material or as a result of unforeseen circumstances (e.g., fire), it is unlikely that a naturally occurring temperature higher than 200°C will be reached. The GEMS program is a universal code for geochemical modeling, which requires the input of elemental data and is based on the analysis of elemental composition, utilizing Gibbs energy to calculate phase assemblages and equilibrium specifications. Process parameters during simulations in GEMS (temperature, pressure) influence chemical reactions, the formation, and transformation of solid hydrates (concrete crystallizes differently than autoclaved materials). In the studies, attention was focused on analyzing the crystallization process and the formation of phases considered to be associated with water loss in the material, among others, during exposure to high temperatures, such as autoclaving (the so-called path regulated by the thermodynamic stability of phases).

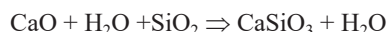
Results

The proposed modification involved replacing crystalline quartz sand with amorphous glass sand from recycled glass. Tests were conducted based on the following standards: PN-EN 1996-2:2010; Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 2: Design requirements, materials selection and execution of masonry; PN-EN 772-13:2001 Test methods for masonry units; PN-EN 771-2+A1:2015-10 Requirements for components. As part of the solution, the raw material modifier, consisting of sand (90%), lime (7%), and water (3%), was recycled glass sand GS in an amount of 10–90% GS by weight, with 90% GS meaning the complete elimination of SiO₂ quartz sand (QS) in favor of glass sand GS.

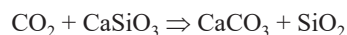
(3% H₂O). Propozycja modyfikacji polegała na zastąpieniu piasku kwarcowego „QS” piaskiem szklanym z recyklingu szkła kolorowego „GS” w ilości 10 – 90%, skróceniu czasu autoklawizacji do 5 h i zastosowaniu programu GEMS-PSI do analizy składu fazowego i projektowania cegieł autoklawizowanych na etapie laboratoryjnym. Produkcja laboratoryjna obejmowała wykonanie cegieł o wymiarach 5×5×5 cm. Wykorzystany został autoklaw laboratoryjny, a proces produkcji był odwzorowaniem produkcji w warunkach przemysłowych. Program GEMS-PSI [6, 16, 17] został zastosowany do prowadzenia symulacji termodynamicznej w celu określania stopnia krystalizacji uwodnionych krzemianów wapnia w ceglach autoklawizowanych modyfikowanych piaskiem szklanym GS. Analiza składu fazowego w programie GEMS bazuje na wykorzystaniu danych z bazy danych Cemdata18, która została opracowana przez prof. B. Lothenbach i jej współpracowników z Empa dla uwodnionego cementu portlandzkiego, glinianu wapnia, sulfoglinianu wapnia, fosforanu i cementów mieszanych, a także materiałów aktywowanych alkalicznie. Cemdata18 zawiera dane termodynamiczne powszechnych hydratów cementu, takich jak fazy C-S-H, AFm i AFt, hydrogranat, hydrotalcyt, fosforany, zeolity i M-S-H. Korzystanie z bazy danych Cemdata18 w kodach GEMS wymaga również użycia bazy danych PSI/Nagra TDB w wersji GEMS (dostarczanej z kodami GEM-Selektor [6, 18, 19]). Materiały silikatowe, ze względu na proces produkcji w temperaturze 200°C wykluczają problem związany z krystalizacją, gdy poza sztucznym podgrzewaniem materiału lub w wyniku sytuacji losowej (np. pożar), naturalne osiągnięcie temperatury wyższej niż 200°C jest mało prawdopodobne. Program GEMS to uniwersalny kod do modelowania geochemicznego, który wymaga wprowadzenia danych elementarnych i bazuje na analizie składu pierwiastkowego, wykorzystując energię Gibbsa do obliczania zespołów i specyfikacji równowagi fazowej. Parametry procesu podczas symulacji w GEMS (temperatura, ciśnienie) mają wpływ na reakcje chemiczne, tworzenie i transformację stałych hydratów (inaczej krystalizuje beton i materiały autoklawizowane). W badaniach uwaga zwrócona została na analizę procesu krystalizacji i powstawania faz, które uważa się za związane z utratą wody w materiale m.in. podczas działania na wyrób wysokiej temperatury, np. autoklawizacja (tzw. ścieżka regulowana termodynamiczną stabilnością faz).

Wyniki

Proponowana modyfikacja dotyczyła zastąpienia piasku kwarcowego o strukturze krystalicznej, amorficznym piaskiem szklanym z recyklingu szkła. Badania wykonano wg norm PN-EN 1996-2:2010; Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych – Cz. 2: Wymagania projektowe, dobór materiałów i wykonanie murów; PN-EN 772-13:2001 Metody badań elementów murowych; PN-EN 771-2+A1:2015-10 Wymagania dotyczące elementów. W ramach rozwiązania, modyfikatorem masy surowcowej, składającej się z piasku (90%), wapna (7%) i wody (3%), był piasek szklany GS z recyklingu szkła w ilości 10–90% w stosunku do masy wyrobu, przy czym 90% GS



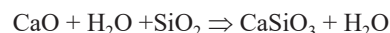
[Formation: CSH or at elevated temperatures of the crystalline phases tobermorite, jennite, and awflite]



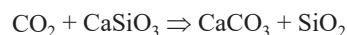
In laboratory bricks created by modifying the composition with recycled glass sand, the following phases were formed: gyrolite (37%) and natrolite (5%), whereas in traditional silicate bricks the tobermorite phase dominates (table 1). The GEMS mineral database supplemented by a cement database was used for the simulation.

Figure 1 shows the results of a simulation using the GEMS-PSI program and the phase composition of silicate bricks modified by glass sand, both by weight and volume. CO₂-free conditions were assumed in the calculations. Structures and

oznaczało całkowitą eliminację piasku kwarcowego SiO₂ (QS) na rzecz piasku szklanego GS.



(tworzenie CSH lub w podwyższonej temperaturze faz krystalicznych tobermoryt, jennit, awfilit)



W ceglach wykonanych w laboratorium powstałych w wyniku modyfikacji składu z zastosowaniem piasku szklanego z recyklingu, powstały fazy: gyrolitowa (w ilości 37%) oraz natrolitowa (w ilości 5%), podczas gdy w tradycyjnej cegle silikatowej dominuje faza tobermorytowa (tabela 1). Do symulacji wykorzystano bazę danych minerałów z programu GEMS, uzupełnioną bazą danych cementu.

Table 1. Thermodynamic data of the phase composition of silicate bricks [15]

Tabela 1. Dane termodynamiczne składu fazowego cegieł silikatowych [15]

Phase type/ Nazwa	Formula/Formuła	$\Delta_f G^\circ$ [kJ/mol]	$\Delta_f H^\circ$ [kJ/mol]	S° [J/K/mol]	C_p° [J/K·mol]	V° [cm ³ /mol]	M [g·mol ⁻¹]
Gyrolite/ Gyrolit	$\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_{7.5}(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-4550	-4917	309	325	137	337,4
Xonotlite/ Ksonotlit	$\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$	-9465	-10022	573	628	256,9	714,985
Natrolite/ Natrolit	$\text{Na}_2(\text{Al}_2\text{Si}_3)\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-53166	-57186	359	359,23	169,200	380,224

$\Delta_f G^\circ$ – standard molar Gibbs energy of formation at $T_0 = 298$ K/standardowa energia Gibbsa w procesach przemian fazowych w temperaturze $T_0 = 298$ K;

$\Delta_f H^\circ$ – standard molar enthalpy at $T_0 = 298$ K/standardowa molowa entalpia w procesach przemian fazowych przy temperaturze $T_0 = 298$ K;

S° – standard molar entropy at $T_0 = 298$ K/standardowa molowa entropia w temperaturze $T_0 = 298$ K;

C_p° – heat capacity at $T_0 = 298$ K/ciepło właściwe w temperaturze $T_0 = 298$ K,

V° – molar volume/objętość molowa

phases similar to natrolite emerged, including the presence of sodium compounds ($\text{Na}_2(\text{Al}_2\text{Si}_3)\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) or gyrolite ($\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_{7.5}(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Table 2 and Figure 1a illustrate the phase composition of silicate bricks modified by GS, with the potential for precipitation of the C-S-H phase. In this simulation, the C-S-H phase accounted for 37% by weight and 34% by volume. The remaining phases were the M-S-H phase (with MgO

Rysunek 1 przedstawia wyniki symulacji z zastosowaniem programu GEMS-PSI oraz skład fazowy cegieł silikatowych modyfikowanych piaskiem szklanym w ujęciu wagowym i objętościowym. W obliczeniach przyjęto warunki wolne od CO₂. Pojawiły się struktury i fazy zbliżone do natrolitu – udział związków sodu ($\text{Na}_2(\text{Al}_2\text{Si}_3)\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), bądź gyrolitu ($\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_{7.5}(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

substitution), gyrolite, and natrolite. Table 3 and Figure 1b) present a simulation during which the possibility of precipitation of the C-S-H phase was limited. In this case, the C-S-H phase does not form, and instead of the M-S-H phase, brucite appears, alongside natrolite and gyrolite. Thermodynamic

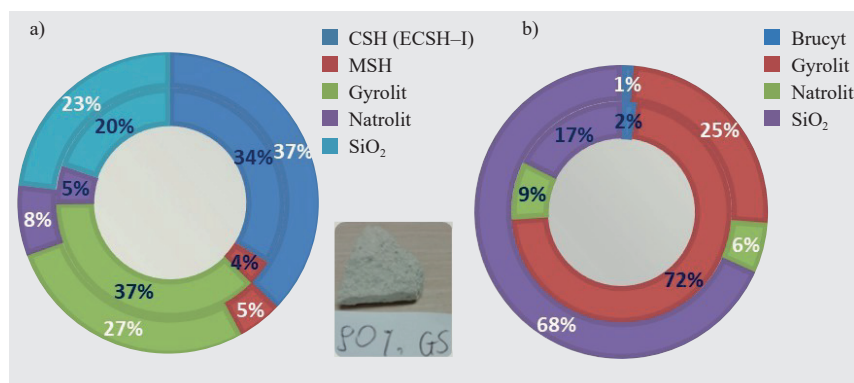


Fig. 1. Thermodynamic analysis of laboratory silicate bricks using GS: a) with the possibility of precipitation of the C-S-H phase; b) with suppression of precipitation of the C-S-H phase

Rys. 1. Analiza termodynamiczna laboratoryjnych cegieł silikatowych z zastosowaniem GS: a) z możliwością wytrącania się fazy C-S-H; b) ze stłumieniem wytrącania się fazy C-S-H

W tabeli 2 i na rysunku 1a) zobrazowano skład fazowy cegieł silikatowych modyfikowanych GS z możliwością wytrącania się fazy C-S-H. W przypadku tej symulacji masa wagowa fazy C-S-H wyniosła 37%, a objętościowa 34%. Pozostałymi fazami są: faza M-S-H (z podstawieniem MgO), gyrolit i natrolit.

data for gyrolite and xontolite were taken from [http://thermoddem.brgm.fr/], while the pH was calculated at 14.4.

To illustrate the results of the thermodynamic simulation, an analysis of the internal structure of bricks modified by glass sand was performed using a computed tomography (CT) scan (Photo 1). The texture of bricks modified with glass sand is more consistent, which is due to the greater number of pores

Table 2. Weight and volume composition (%) of solid phases in silicate brick modified by glass sand based on thermodynamic simulation at 20°C

Tabela 2. Skład wagowy i objętościowy (%) faz stałych w cegle silikatowej modyfikowanej piaskiem szklanym na podstawie symulacji termodynamicznej w temperaturze 20°C

Phase type/ Typ fazy	Solid phase mass [g]/ Masa faz stałych [g]	Solid phase volume [cm³]/ Objętość faz stałych [cm³]
CSH (ECSSH-I)	373.29557	132.84704
MSH	40.637213	17.119778
Gyrolite/ Gyrolit	414.16606	97.280792
Natrolite/ Natrolit	59.665595	26.551255
SiO ₂	218.3738	82.4586

enclosed in the material. The amount of air voids in the traditional laboratory brick is 22.41%, while in the brick made with glass sand (90%) it is 20.33% [17].

Figure 2 shows an increase in strength with increasing glass sand content in the raw material (up to approximately 20 MPa in laboratory production). The consistency of the silicate raw material made from glass sand is plastic. Analysis of the chemical composition revealed the presence of sodium compounds, which in excessive amounts can cause swelling of the material.

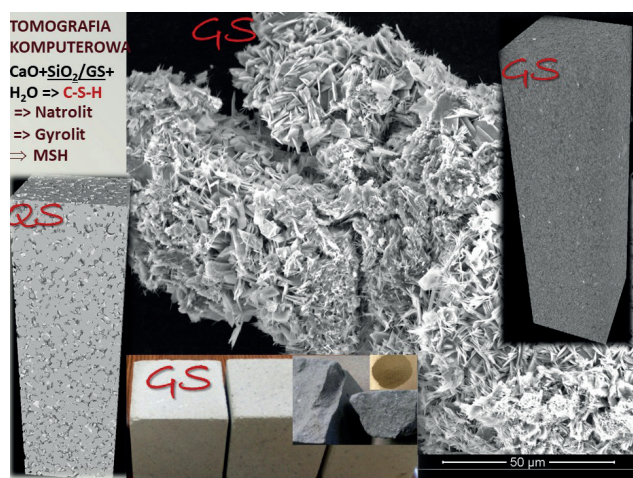


Photo 1. CT analysis – computed tomography of (5x5x5 cm) traditional (QS) silicate bricks and bricks modified by glass sand GS
Fot. 1. Analiza CT – tomografia komputerowa cegieł silikatowych (5x5x5 cm) tradycyjnych (QS) oraz modyfikowanych piaskiem szklanym GS

Z kolei tabela 3 i rysunek 1b) przedstawiają symulację, podczas której ograniczono możliwość wytrącania się fazy C-S-H. W tym przypadku faza C-S-H nie powstaje, natomiast zamiast fazy M-S-H pojawił się brucyt, obok natrolitu i gyrolitu. Dane termodynamiczne dotyczące gyrolitu i ksontolitu zaczerpnięto z [http://thermoddem.brgm.fr/], natomiast pH obliczono na poziomie 14,4.

Table 3. Weight and volume composition (%) of solid phases in silicate brick modified by glass sand based on thermodynamic simulation at 20°C, during which the precipitation of the C-S-H phase was suppressed

Tabela 3. Skład wagowy i objętościowy (%) faz stałych w cegle silikatowej modyfikowanej piaskiem szklanym na podstawie symulacji termodynamicznej w temperaturze 20°C, podczas której wytrącanie fazy C-S-H zostało stłumione

Phase type/ Typ fazy	Solid phase mass [g]/ Masa faz stałych [g]	Solid phase volume [cm³]/ Objętość faz stałych [cm³]
Brucit/ Brucyt	15.91	6.72
Gyrolite/ Gyrolit	502.461	118.01995
Natrolite/ Natrolit	59.66595	26.55
SiO ₂	122.594	324.66

W celu zobrazowania wyników przeprowadzonej symulacji termodynamicznej wykonano analizę budowy wewnętrznej cegieł modyfikowanych piaskiem szklanym, stosując badanie tomografem komputerowym (fotografia 1). Tekstura cegieł modyfikowanych piaskiem szklanym jest bardziej spójna, co ma związek z większą liczbą porów zamkniętych w materiale. Ilość pustek powietrznych w cegle laboratoryjnej tradycyjnej wynosi: 22,41%, natomiast w cegle wykonanej na bazie piasku szklanego (90%) 20,33% [17].

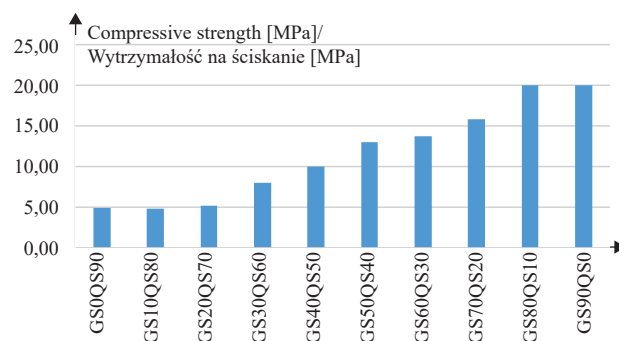


Fig. 2. Strength analysis of silicate bricks modified with glass sand in the amount of 0-90%, where the GS0QS90 sample means 0% glass sand and 90% quartz sand and the GS90QS0 sample means 90% glass sand and 0% quartz sand

Rys. 2. Analiza wytrzymałości cegieł silikatowych modyfikowanych piaskiem szklanym w ilości 0–90%, przy czym próbka GS0QS90 oznacza 0% piasku szklanego i 90% piasku kwarcowego i odpowiednio próbka GS90QS0 – oznacza 90% piasku szklanego i 0% piasku kwarcowego

To eliminate this and reduce the costs of glass cullet processing, its use can be limited to 20–40%, while still meeting the strength requirements of the modified material.

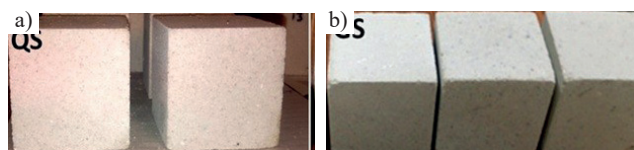


Photo 2. Laboratory silicate bricks after 5 hours of autoclaving process: a) traditional sand-lime bricks made from quartz sand (QS); b) bricks modified by 90% recycled glass sand (GS)

Fot. 2. Laboracyjne cegły silikatowe po 5 h autoklawizacji: a) cegły tradycyjne wykonane na bazie piasku kwarcowego (QS); b) cegły modyfikowane w 90% piaskiem szklanym z recyklingu (GS)

Conclusions

The presented studies indicate the validity of the proposed modification. The compressive strength of traditional silicate material is 15–20 MPa, whereas under laboratory conditions a material with a strength of approximately 20.3 MPa was obtained after five hours of autoclaving (photograph 2), with a limitation of its use or with the complete elimination of quartz sand (SiO_2). Phase composition analysis revealed the presence of gyrolite and natrolite phases instead of tobermorite in materials modified by recycled glass sand. Based on this information, computer simulations using software such as GEMS program can be performed at the design stage, thus reducing the number of ineffective laboratory tests, saving time, materials and energy.

Na rysunku 2 widać zwiększanie wytrzymałości wraz ze wzrostem udziału piasku szklanego w masie surowcowej (do ok. 20 MPa w produkcji laboratoryjnej). Konsystencja silikatowej masy surowcowej wykonanej na bazie piasku szklanego jest plastyczna. Analiza składu chemicznego wykazała obecność związków sodu, które w nadmiernej ilości mogą prowadzić do pęcznienia materiału. W celu jego wyeliminowania i ograniczenia kosztów przerobu stłuczki szklanej, można ograniczyć jej zastosowanie do 20–40%, spełniając przy tym wymagania wytrzymałościowe modyfikowanego materiału.

Wnioski

Przedstawione badania wskazują na prawidłowość proponowanej modyfikacji. Wytrzymałość na ściskanie tradycyjnego materiału silikatowego wynosi 15–20 MPa, natomiast w warunkach laboratoryjnych otrzymano materiał o wytrzymałości na poziomie ok. 20,3 MPa przy pięciogodzinnym czasie autoklawizacji (fotografia 2) i z ograniczeniem zastosowania lub przy całkowitej eliminacji piasku kwarcowego (SiO_2). Analiza składu fazowego wykazała obecność fazy gyrolitowej i natrolitowej zamiast tobermorytowej w materiałach modyfikowanych piaskiem szklanym z recyklingu. Na podstawie tego typu informacji można już na etapie projektowania cegieł silikatowych starać się wykonywać symulacje komputerowe, z zastosowaniem programu np. GEMS i tym samym ograniczyć liczbę nieefektywnych prób laboratoryjnych, oszczędzając czas, materiały oraz energię.

Received: 30.07.2025

Revised: 02.09.2025

Published: 21.11.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 30.06.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 25.08.2025 r.

Opublikowano: 21.11.2025 r.

Literature

- [1] Kuczera A., Płoszaj-Mazurek M. Zerowy ślad węglowy budynków. Mapa drogowa dekarbonatyzacji budownictwa do roku 2050. *Polskie Stowarzyszenie Budownictwa Ekologicznego*, Czerwiec 2021.
- [2] Kundzewicz Z. Czy zabraknie nam wody? *Zielone wiadomości* 27.04.2020, ISSN 2657–9596. <https://zielonewiadomosci.pl/zw/czy-zabraknie-nam-wody/> Dostęp 28.10.2025 r.
- [3] Walidula M. Zużycie wody na świecie. <https://mojawoda.com/porady/117/srednie-zuzycie-wody-na-osobe-w-m3-i-litrach-kalkulator-zuzycia-wody-2024> Dostęp 28.10.2025 r.
- [4] EPEA/Matthias Heinrich; <https://swiat-szkla.pl/article/18203-recykling-szka-paskiego-stan-obecny> Dostęp 21.04.2025 r.
- [5] <https://ekantor.pl/tak-nie-buduj-czyli-4-nietrafione-inwestycje-w-budynki/?args> Dostęp 28.08.2025 r.
- [6] <https://gems.web.psi.ch/tests/> 19.03.2025 r.
- [7] <https://klimat.rp.pl/zielone-technologie/art17074381-dlaczego-krajeimportuja-piasek-z-drugiego-konca-swiata> Dostęp 21.04.2025 r.
- [8] Adamczyk G. Czy druk 3D może pomóc w odnawianiu raf koralowych? (artykuł z 01 listopada 2022) <https://swiatoze.pl/czy-druk-3d-moze-pomoc-w-odnawianiu-raf-koralowych/> Dostęp 21.04.2025 r.
- [9] The mining of sand, a non-renewable resource, UNEP (2014), <http://www.greenfacts.org/https://www.greenfacts.org/en/sand-extraction/index.htm> Dostęp 21.03.2025 r.
- [10] <https://nikalab.pl/blogs/ekologia/dlaczego-szklo-nie-jest-eko> Dostęp 21.03.2025 r.

- [11] <https://klimada2.ios.gov.pl/zuzycie-zasobow/> Dostęp 21.03.2025 r.
- [12] <https://www.forbes.com/sites/alanohnsman/2023/04/12/equatic-startup-co2-green-hydrogen/?sh=7e594ad6426a> Dostęp 23.03.2025 r.
- [13] Vance K, Falzone G, Pignatelli I, Bauchy M, Balonis M, Sant G. Direct Carbonation of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Using Liquid and Supercritical CO_2 : Implications for Carbon-Neutral Cementation. *Industrial & Engineering Chemistry Research* Volume 54, Issue 36. American Chemical Society 2015.
- [14] Kuśnierz A. Recykling szkła. *Wydawnictwo Instytut Śląski Sp. z o.o. Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych 2010*, Tom R. 3, nr 6, [www_bg_utp_edu_plartpicimb20nr2062010picimb6kusnierz22.pdf](http://www.bg.utp.edu.pl/artpicimb20nr2062010picimb6kusnierz22.pdf)
- [15] <https://www.swiat-szkla.pl/kontakt/948-technologiczne-aspekty-produkcji-szkla.html> Dostęp 23.03.2025 r.
- [16] <https://gems.web.psi.ch/tests/TestNaCl-dep.html> Dostęp 19.03.2025 r.
- [17] Stepien A. Recycling in Building Materials: Analysis of the Possibilities and Results of Using Recycled Glass Sand in Autoclaved Materials. *Energies* 2023, 16, 3529. <https://doi.org/10.3390/en16083529>.
- [18] Lothenbach B, Kulik DA, Matschei T, Balonis M, Baquerizo L, Dilnesa BZ, Miron GD, Myers R. Cemdata18: A chemical thermodynamic database for hydrated Portland cements and alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research* 115, (2019), pp. 472–506.
- [19] <https://cemgems.org/cemdata/about-cemdata/> Dostęp 29.10.2025 r.