

prof. dr hab. inż. Lech Czarnecki¹⁾
ORCID: 0000-0003-3340-9075

Zrównoważone wyroby budowlane – piękna idea, konieczność cywilizacyjna czy też imperatyw termodynamiczny

Sustainable building products – beautiful idea, civilisation necessity or thermodynamic imperative

DOI: 10.15199/33.2022.01.09

Streszczenie. Rozważono uwarunkowania konieczności zrównoważenia wyrobów budowlanych. Poczynając od przesłanek filozoficznych, takich jak „piękna idea”, „konieczność cywilizacyjna”, aż po „imperatyw termodynamiczny”. Nawiązano do dokumentu ONZ *Nasza wspólna przyszłość* i encykliki ekologicznej papieża, a także do Wymagań Podstawowych, CPR-UE 305, aż po konsekwencje zasad termodynamiki. Wskazano, że zasady termodynamiczne, jako prawa naturalne, oddziałują niezależnie od ich uświadomienia i sposobu sformułowania. W budownictwie prawa termodynamiki są znacznie mniej uświadamiane niż prawa mechaniki. Pokazano, że Wymagania Podstawowe ewoluowały w historii i obecnie coraz mocniej nawiązują do zasad termodynamiki. Zdefiniowano barierę termodynamiczną i wskaźnik zysku do nakładu energetycznego (EROI) oraz przytoczono postulat przemiany prometejskiej w technologii. Przeanalizowano, jak te uwarunkowania stanowią o konieczności i ograniczeniach innowacyjności budowlanej. Podkreślono nadzieje związane z gospodarką obiegu zamkniętego i wykorzystaniem w technologii zjawiska synergii oddziaływania pomiędzy składnikami kompozytów budowlanych.

Słowa kluczowe: wyroby zrównoważone; przesłanki filozoficzne; zasady termodynamiki; Wymagania Podstawowe; bariera termodynamiczna; wskaźnik EROI; przemiana prometejska; innowacyjność budowlana; gospodarka obiegu zamkniętego; synergia.

Zrównoważone wyroby budowlane to produkty zrównoważonego rozwoju, ale zarazem elementy kształtujące zrównoważony ład. Zrównoważony rozwój, w największym skrócie, to takie działanie, które zaspokajając potrzeby współczesnych, nie ogranicza możliwości kolejnych pokoleń. Szlachetna oczywistość zakłeta w tym stwierdzeniu spowodowała, że zostało ono szeroko rozpowszechnione i powszechnie przyjęte.

Do rozpowszechnienia i wdrożenia idei zrównoważonego budownictwa w Polsce przyczyniła się niewątpliwie działalność publikacyjna na łamach „Materiałów Budowlanych” zapoczątkowana przed dziesięcioma laty artykułem *Definiowanie zrównoważonego budownictwa* [3] i od tego czasu systematycznie prowadzone są działania wydawnicze poświęcone tej proble-

Abstract. Conditions for the necessity of sustainable construction products have been considered, beginning with philosophical premises such as „a beautiful idea”, „civilization necessity” and „thermodynamic imperative”. Reference was made to the „Our Common Future” UN document, the Pope's ecological Encyclical, and to the CPR-EU 305 Basic Requirements, as well as to the consequences of the principles of thermodynamics. It has been shown that thermodynamic laws, as natural laws, act regardless of one's awareness of their existence or the laws of their formulation. In building construction there is a lot less awareness pertaining to the laws of thermodynamics than there is surrounding the laws of mechanics. Throughout history the Basic Requirements have evolved and now are closely related to the principles of thermodynamics. In the paper the thermodynamic barrier and the profit-to-energy ratio, EROI, were defined, and the postulate of the Promethean transformation in technology was presented. An analysis was carried out of how these conditions determine the necessity and limitations of construction building innovation. In the paper there is emphasis on the hope of the further development of circular economy and the use of the synergy of interaction between the components of building composites in technology.

Keywords: sustainable products; philosophical premises; principles of thermodynamics; Basic Requirements; thermodynamic barrier; EROI index; Promethean transformation; construction innovation; circular economy; synergy.

matyce. Powszechność stosowania i akceptacji słów „zrównoważony” czy też „zrównoważone” powoduje, że pojęcia obdarte tym określeniem tracą swoją unikatowość, przestają być wyjątkowe. Z drugiej strony „spowszechnienie” nie oznacza wykonania zadania. Obiekty budowlane zaspokajają jedną z podstawowych potrzeb człowieka. W tym kontekście, w połączeniu z presją rozwoju demograficznego, zrównoważony rozwój budownictwa staje się koniecznością cywilizacyjną. Nawiązując do drugiej zasady termodynamiki, gdyby uwarunkowania [1, 18] wskazywały, że oddziałujemy w pobliżu bariery termodynamicznej, to zrównoważony rozwój staje się imperatywem termodynamicznym. Zważywszy, że prawa natury działają niezależnie od ich uświadomienia i sposobu sformułowania, to uwarunkowaniom termodynamicznym należałoby przypisać stanowiący charakter. Artykuł poświęcono rozważaniu tych zagadnień.

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej; l.czarnecki@itb.pl

Piękna idea

Piękna idea to „taki rozwój, który zaspokajając potrzeby obecne, nie ograniczy przyszłych pokoleń”. To myśl przewodnia raportu ONZ, przedstawionego w 1987 r. przez premier Szwecji Gro Harlem Brundtland, zatytułowanego *Nasza wspólna przyszłość* [2]. W „Małym Księciu” [19] 40 lat wcześniej de Saint-Exupéry nadał tej konieczności cywilizacyjnej wymiar etyczny: *Ziemi nie dziedziczymy po naszych rodzicach, pożyczamy ją od naszych dzieci*. W 2015 r. papież Franciszek w encyklice „Laudato Si – Pochwalony Bądź Panie” [15] nadaje jej wymiar transcendentalny i przestrzega przed grzechem ekologicznym.

W 2011 r. Rozporządzenie Parlamentu i Rady Europejskiej [14] wprowadziło warunek zrównoważenia do Wymagań Podstawowych. Stało się to po upływie ćwierćwiecza od ogłoszenia dokumentu *Nasza wspólna przyszłość*. Te 25 lat obrazują stałą czasową naszej cywilizacji – okres pomiędzy sformulowaniem idei a wdrożeniem wymagania. Nowe siódme wymaganie podstawowe brzmi: **zrównoważone wykorzystanie zasobów naturalnych**, które – jak wyjaśniono w dalszym ciągu sformułowania – może być zrealizowane przez:

- ponowne wykorzystanie lub recykлизację;
- zapewnienie trwałości;
- użycie surowców przyjaznych środowisku lub materiałów wtórnych.

Wymaganie to zdecydowanie wskazuje, a nawet ogranicza, przyszłe rozwiązania wyrobów budowlanych.

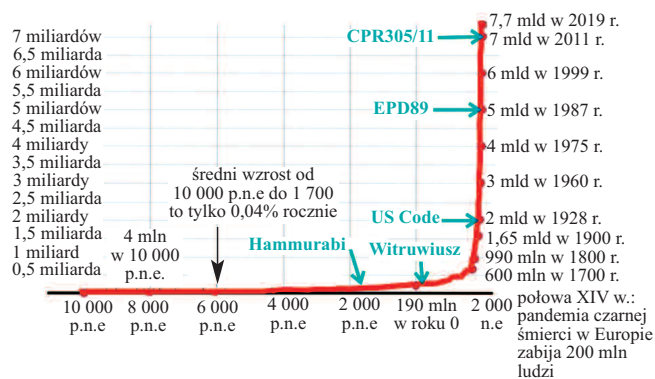
Konieczność cywilizacyjna

Obiekty budowlane służą zaspokojeniu jednej z podstawowych potrzeb człowieka. Prawie 50% ludności żyje w miastach, które pokrywają tylko 2% powierzchni kuli ziemskiej, ale konsumują 75% wytwarzanej energii, zużywają więcej niż 40% materiałów i emitują 80% gazów cieplarnianych. Budownictwo jest odpowiedzialne także za ponad 30% ogólnego zużycia wody i tyleż powstających odpadów. Wszystko to dzieje się na osi czasu. Populacja zwiększa się niemal szybciej, niż wybija nasz puls (rysunek 1), tony śmieci stałych powstają w mgnieniu oka, tony CO₂ emitowane są do atmosfery jeszcze szybciej, a temperatura zmienia się w ciągu sekundy na dziesiątym miejscu [17]. Próbuując określić dynamikę zmian, możemy zauważyć, że co jedną sekundę:

- rodzą się dwie osoby;
- generujemy 100 ton odpadów stałych;
- emitujemy 1000 ton CO₂;
- temperatura wzrasta o 2,5 nanokelwina.

Nieustanny wzrost populacji wywiera istotną presję na postęp i rozwój budownictwa. Pojęcia te są często używane zamiennie. „Postęp” koncentruje się jednak na wyrobie (nowe, udoskonalone). „Rozwój” dotyczy przede wszystkim metod i technologii oraz ich ilości. Celem jest ochrona dobrego życia – budynki i obiekty infrastrukturalne to element dobrego życia, a budowle użyteczności publicznej, w tym reprezentacyjne, dokumentują osiągnięcia cywilizacyjne. Właściwie zdefiniowana użyteczność budowlana staje się wskazaniem zrównoważonego rozwoju.

Ocena i dobór materiału wg użyteczności (ang. *performance concept*) zyskuje coraz większe uznanie w budownictwie.



Rys. 1. Podstawowe wymagania a rozwój populacji [4]

Fig. 1. Basic requirements versus population development based on [4]

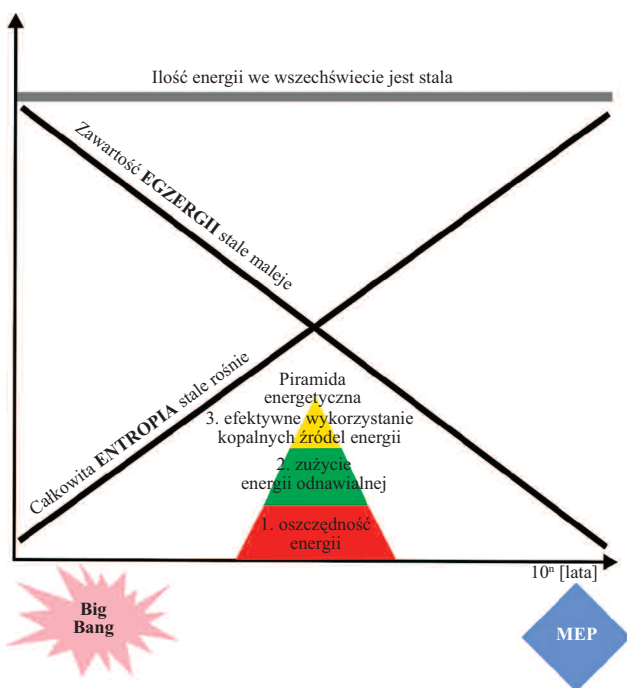
W wielu normach europejskich pojęcie to zostało podniesione do rangi tytułu. Wyzwaniem pozostaje sformułowanie kryteriów użyteczności w odniesieniu do różnego zastosowania, tzn. dobór zbioru cech i ich wartości decydujących o przydatności w danym zastosowaniu. Na poziomie jednostkowym można wymienić przykłady zapewnienia trwałości, utrzymania i modernizacji istniejących obiektów budowlanych [5], a w konsekwencji naprawę konstrukcji jako sposób zwiększenia zrównoważoności zasobów budowlanych [6]. Społeczne znaczenie poprawy zrównoważoności przez naprawę konstrukcji nie może być jednak przeceniane. Rehabilitacja obiektów budowlanych ma coraz większy udział w działalności budowlanej [7, 8], ale nie oczekuje się, że stanie się to jedynym sposobem zaspokojenia stale rosnących potrzeb społecznych. Obiekty budowlane, powoli, lecz stale, podlegają transformacji z obiektów biurowych w mieszkalne, z fabryk w restauracje, ze starych domostw w muzea itp.

Przystosowanie istniejących obiektów do nowych potrzeb – połączone z ich naprawami – to realizacja zrównoważenia [8]. Zawsze jednak „żywot” części obiektów będzie się po określonym czasie kończył rozbiórką, a następnie powtórny użyciem niektórych elementów i recykлизacją pozostałych.

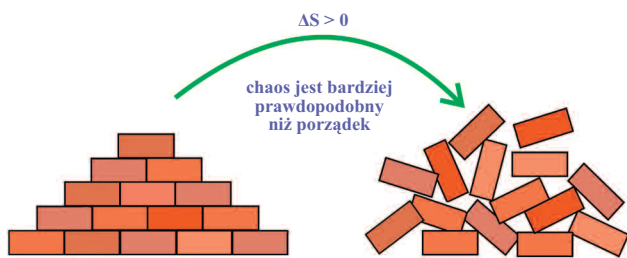
Imperatyw termodynamiczny

W budownictwie prawa termodynamiki są znacznie mniej uświadamiane niż prawa mechaniki [9]. Pierwsza zasada termodynamiki mówi, że energia w układzie zamkniętym nie zmienia się. Prawo zachowania materii obejmuje prawo zachowania masy i prawo zachowania energii. Energia ani nie powstaje, ani nie zanika, ale może zmieniać swoją postać na sposób ciepła lub pracy. Nie możemy jednak prosto przekształcać jednej formy energii w inną, procesom rzeczywistym zawsze towarzyszy wzrost entropii (rysunek 2); energia zostaje rozproszona w postaci ciepła, powstają produkty odpadowe. Tylko część energii może być wykorzystana jako praca użyteczna – egzergia.

Dругa zasada termodynamiki mówi, że chaos jest bardziej prawdopodobny niż porządek. Tej przemianie towarzyszy wzrost entropii – $\Delta S > 0$ (rysunek 3). Wszystkie procesy samorzutne przebiegają w określonym kierunku, czas i przyroda zmieniają się w sposób nieodwracalny. Stały wzrost entropii decyduje o nieuchronności degradacji elementów budowlanych.



Rys. 2. Energia, egzergia i entropia układu kosmologicznego na osi czasu, od Big Bang do MEP – Maximum Entropy Production [10]
 Fig. 2. Energy, exergy and entropy in cosmological setting – from Big Bang to MEP – Maximum Entropy Production [10]



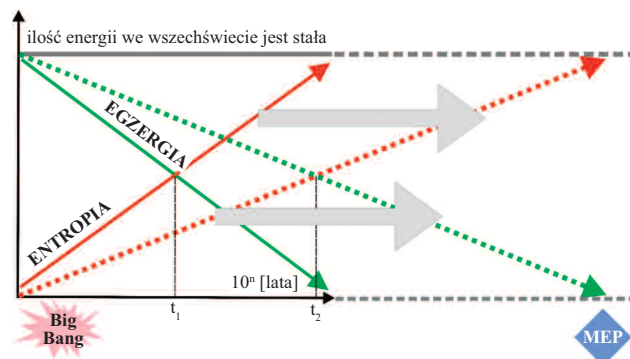
Ry. 3. Działanie drugiej zasady termodynamiki
 Fig. 3. Illustration of the second law of thermodynamics

Analizując współczesną wersję Wymagań Podstawowych, można zauważyć, że mamy tu zdecydowane nawiązanie do zasad mechaniki Newtona (nośność i stateczność) oraz do pierwszej zasady termodynamiki – zasoby są ograniczone, a także dyskretne nawiązania do drugiej zasady – trwałość. Ograniczenie zasobów naturalnych dotyczy zarówno surowców mineralnych, jak i źródeł energii. Energia naszej planety jest zasilana energią słoneczną. Dzięki promieniowaniu słonecznemu ekosystem zyskuje odnawialną charakterystykę. W skali ludzkiego istnienia ta odnawialność nie dotyczy zasobów kopalnych. Zasoby kopalne są nieodnawialnym źródłem energii. Do odnawialnych źródeł energii należą wiatr i fotowoltaika, a także energia spadku wody (hydroelektryczność). W odniesieniu do dziejów planety entropia stale rośnie, a egzergia maleje. Jako punkt osobliwy można wyróżnić zrównanie entropii z egzergią, a następnie stale zwiększającą się przewagę entropii nad egzergią (rysunek 2). W odniesieniu do wybranych układów (lokalnie i chwilowo) można to interpretować jako wystąpienie bariery termodynamicznej. Jest to interpretacja intuicyjna i w sensie fizycznym pozorna, ponieważ funkcje te są wy-

rażane w różnych jednostkach: egzergia w J, a entropia w J/K. Tę „pozorność” można próbować wyeliminować, rozpatrując nie egzergię i entropię, lecz egzergię i Energię Efektów Entropii (EEE), wyrażoną iloczynem entropii generowanej i temperatury otoczenia.

W przypadku, gdy poszukujemy lub pozyskujemy energię w pobliżu bariery termodynamicznej, to natrafiamy na „bezwzględne” przeszkody, gdy nakład energetyczny zaczyna przekraczać zysk energetyczny. Znajduje to swój wyraz w wartości wskaźnika EROI (ang. *Energy Returned On Investment*). Dobrze rokują także technologie, których EROI znacznie przewyższa 1, np. w przypadku ropy naftowej ze złóż łupkowych wynosi on ok. 1,5 [21], a hydroelektryczności 50 [1].

Pół wieku temu **Nicholas Georgescu-Roegen**, amerykański uczony pochodzenia rumuńskiego, sformułował postulat „przemiany prometejskiej”, tzn. takiej zmiany technologii, która zapewni zysk energetyczny kilkadziesiąt razy przekraczający nakłady [16]. Dotychczasowe poszukiwania nie zostały uwiecznione wystarczającym powodzeniem [4]. W kategoriach termodynamicznych oznacza to zmniejszanie entalpii/egzergii koniecznej do zaistnienia procesu i zmniejszania entropii powstającej w jego wyniku oraz odsuwania w czasie „bariery termodynamicznej” (rysunek 4).



Rys. 4. Ilustracja przemiany prometejskiej w kategoriach termodynamicznych; $\Delta t = t_2 - t_1$ przesunięcie w czasie „pozornej” bariery termodynamicznej [4]

Fig. 4. Illustration of the Promethean transformation in thermodynamic terms; $\Delta t = t_2 - t_1$ shifting in time the „apparent” thermodynamic barrier [4]

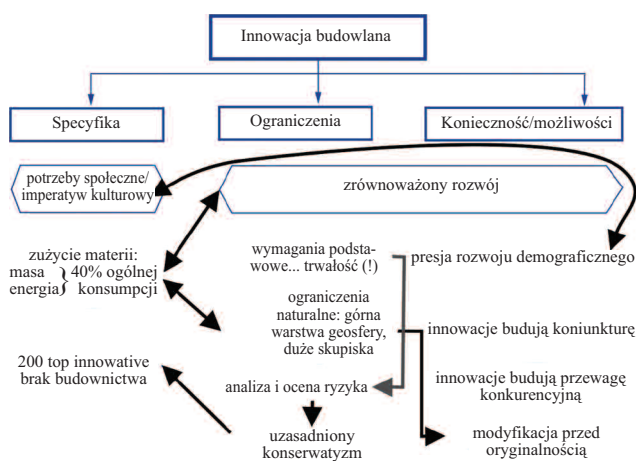
Dążenie do odsuwania tej „bariery” przez modyfikowanie procesów technologicznych dotyczy wszystkich technologii, w tym przede wszystkim budowlanych, ze względu na materiało- i energochłonność. Modyfikacja technologii wytwarzania energii i wyrobów użytecznych (w tym budowlanych) w kierunku ograniczenia konsumpcji egzergii i zmniejszenia powstającej entropii jest „roztropnością cywilizacyjną”.

Innowacyjność budowlana; konieczność i ograniczenia

Obiekty budowlane powinny zapewniać bezpieczeństwo i komfort oraz trwałość użytkowania. Te fundamentalne przesłanki znajdują swój wyraz w Wymaganiach Podstawowych, a ich zmiana z upływem czasu świadczy o tendencji do nadążania za oczekiwaniami użytkowników. Nie bez znaczenia jest też presja demograficzna (rysunek 1). Kodeks Hammurabiego został ogłoszony, gdy ludność świata wynosiła ok. 200 mln,

a w chwili sformułowania obecnie obowiązujących Europejskich Wymagań Podstawowych oraz CPR-EU 305/2011 liczba ludności przekraczała 7 mld. Rozwój demograficzny i potrzeby społeczne definiują konieczność wdrażania innowacji budowlanych. Specyfikę budownictwa stanowi olbrzymie zużycie materii (masy i energii). W konsekwencji jego rozwój napotyka ograniczenia, w tym materialne, wynikające z wyczerpywania dostępności surowców. Charakterystyczne jest to, że np. rozwój technologii betonu odbywa się przede wszystkim przez modyfikację, a nie substytucję składników, a więc modyfikacja technologii jest przed oryginalnością rozwiązań.

Niezależnie, z jakich przesłanek „wychodzimy”, to **obiekt budowlany powinien być zaprojektowany, wzniesiony i rozrebrany zgodnie z wymaganiami zrównoważonego rozwoju** [14]. Nawet jeśli innowacja budowlana pochodzi z innych źródeł niż badania naukowe, to w wyniku tych badań jej przydatność musi być zweryfikowana. Zważywszy, że trwałość obiektów budowlanych niejednokrotnie jest mierzona krotnością życia twórcy, wymaga to wnikliwych badań, analiz i przeprowadzenia oceny ryzyka. Tym też jest podyktowany pewien konserwatyzm przy wdrażaniu nowości w budownictwie. To jest swoisty wyścig pomiędzy opracowaniem nowych rozwiązań materiałowych i pozyskiwaniem nośników energetycznych a wyczerpywaniem się dostępnych zasobów (rysunek 5).



Rys. 5. Holistyczne ujęcie uwarunkowań innowacji budowlanej [11]
Fig. 5. Holistic concept of the determinants of construction innovation [11]

Oczekiwań związanych z przemianą prometejską nie spełniły energetyka jądrowa czy też fotowoltaika. Być może tym razem nie będzie to rozwiązanie jednobarierowe, jak to miało miejsce w przeszłości z opanowaniem ognia (1,9 mln lat p.n.e.). Może to być rozwiązanie systemowe, czego przykładem z historii jest wdrożenie rolnictwa (6 – 9 tys. lat p.n.e.). Do tej roli może aspirować wprowadzenie gospodarki obiegu zamkniętego [20]. W obrębie technologii materiałów budowlanych przejawem dążenia do przemiany prometejskiej jest pogłębianie zrozumienia i wykorzystania zjawiska synergii oddziaływania pomiędzy składnikami kompozytu. Przekonującym przykładem jest „**polimer w betonie**” [12]. Dzięki oddziaływaniom synergistycznym, wpływ polimeru na istotne zmiany właściwości technicznych betonu jest znacznie większy, niż mogłoby to wynikać z udziału masowego tego składnika [13].

Wnioski

Innowacje w budownictwie są koniecznością rozwojową, ale muszą spełnić wymagania podstawowe i być podporządkowane zrównoważonemu rozwojowi. Tak się często dzieje, że ograniczenia zewnętrzne stanowią podstawę rozwoju dziedziny. Zawarte w tytule artykułu opcje: piękna idea, konieczność cywilizacyjna i imperatyw termodynamiczny nie mają charakteru wykluczającego, lecz są współistniejące. Wymagania Podstawowe coraz mocniej nawiązują do zasad termodynamicznych. Jeśli będziemy zmuszeni prowadzić działalność w pobliżu bariery termodynamicznej, to wymagania termodynamiczne stają się bezwzględne.

Literatura

- [1] Bendyk E. 2020. *W Polsce, czyli wszędzie. Rzecz o upadku i przyszłości świata*, s. 358. Warszawa. Wydawnictwo Polityka.
- [2] Brundtland G. H. 1987. „Our Common Future”. *Report on the World Commission on Environment and Development*, s. 383. Oxford University Press.
- [3] Czarniecki Lech, M. Kaproń. 2010. „Definiowanie zrównoważonego budownictwa”. *Materiały Budowlane* (1): 69 – 71.
- [4] Czarniecki Lech, J. Deja. 2021. „Zrównoważone budownictwo; w poszukiwaniu przemiany prometejskiej”. *Inżynieria i Budownictwo* (6).
- [5] Czarniecki Lech, P. Łukowski, A. Garbacz. 2017. *Naprawa i ochrona konstrukcji z betonu. Komentarz do PN-EN 1504*. PWN.
- [6] Czarniecki Lech. 2016. „Wymaganie zrównoważonego wykorzystania zasobów naturalnych w odniesieniu do napraw i ochrony konstrukcji betonowych”. *Materiały Budowlane* (11): 140 – 142.
- [7] Czarniecki Lech, Z. Paszkowski. 2016. „Naprawa, utrzymanie i rewitalizacja jako czynniki kształtujące zrównoważone budownictwo”. *Materiały Budowlane* (5): 126 – 129.
- [8] Czarniecki Lech, Z. Paszkowski. 2016. „Rewitalizacja obszarów miejskich; teoria i praktyka”. *Materiały Budowlane* (5): 138 – 140.
- [9] Czarniecki Lech. 2020. „Moje poszukiwania prawdy w inżynierii materiałów budowlanych”. *Materiały Budowlane* (8): 4 – 11.
- [10] Czarniecki Lech, H. Justnes. 2012. „Zrównoważony trwały beton”. *Cement Wapno Beton*, 17/79, nr 6: 341 – 362. http://cementwapnobeton.pl/pdf/2012/2012_6/Czarniecki-06-12.pdf (dostęp 05.05.2021).
- [11] Czarniecki Lech, D. Van Gemert. 2017. „Innovation in construction materials engineering versus sustainable development”. *Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, Vol. 65, No. 6. <https://doi.org/10.1515/bpasts-2017-0083>.
- [12] Czarniecki Lech. 2007. „Concrete-polymer composites: trends shaping the future”. *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources* 15 (1): 1 – 5.
- [13] Czarniecki Lech, M. Reda Taha, Ru Wang. 2018. Are Polymers Still Driving Forces in Concrete Technology? In: Taha M. (eds) *International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018)*. ICPIC. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78175-4_26.
- [14] Construction Products Regulation, CPR-UE 305/2011 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32011R0305> (dostęp 05.05.2021).
- [15] Encyklika *Laudato Si* Ojca Świętego Franciszka poświęcona trosce o wspólny dom. http://www.vatican.va/content/francesco/pl/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html (dostęp 05.05.2021).
- [16] Georgescu-Roegen N. 1983. „The Promethean condition of viable Technologies”. *Materials and Society*, vol. 7, no 3/4: 425 – 435.
- [17] <https://www.theworldcounts.com/> (dostęp 05.05.2021).
- [18] Rifkin J., T. Howard. 2008. *Entropia – nowy światopogląd*. Katowice. KOS.
- [19] Saint-Exupéry. 2021. *Maly Książę*. Tłum. A. Kozak. Fundacja Nowoczesna Polska. <https://wolnelektury.pl/media/book/pdf/saint-exupery-maly-ksiazka.pdf> (dostęp 05.05.2021).
- [20] Tomaszewska J. 2019. „Polski sektor budowlany a GOZ”. *Materiały Budowlane* (12): 8 – 10. DOI: 10.15199/33.2019.12.01.
- [21] Zimmermann T. 2013. „Parameterized tool for site specific LCAs of wind energy converters”. *Int J Life Cycle Assess* (18): 49 – 60. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0467-y>.

Przyjęto do druku: 17.08.2021 r.