

Analiza rozwoju budynków o standardzie budynku zrównoważonego inteligentnego



prof. dr hab. inż.
ANNA SOBOTKA
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
ORCID: 0000-0002-4477-8821



mgr inż.
MARCIN MALIG
Cavatina GW Sp. z o.o.
ORCID: 0000-0001-8817-1557

W badaniach dokonano analizy budynku o standardzie zbliżonym do standardu budynku inteligentnego, spełniającego wszystkie wymagania wynikające z zasad projektowania budynków dla bezpiecznego użytkowania oraz zasad budownictwa zrównoważonego, w szczególności pasywnego.

Wprowadzenie

Budownictwo zrównoważone inteligentne łączy w sobie idee budownictwa zrównoważonego oraz inteligentnego, a obiekty budowane według tej koncepcji są obecnie uważane za najbardziej przyjazne środowisku. Wykorzystanie automatyki i technologii do sterowania pracą urządzeń mechanicznych w budynkach pozwala skutecznie oszczędzać energię [1], zapewnić bezpieczeństwo i komfort użytkownikom oraz reagować „inteligentnie” na wszystkie stany zewnętrzne i wewnętrzne budynków [2]. Systemy sterownicze, w które wyposażane są budynki, wciąż są doskonałe, z wykorzystaniem osiągnięć techniki i informatyki, w tym technologii IoT (ang. *Internet of Things*). Część deweloperów wydzieliła nową kategorię tej technologii, tzw. Building Internet of Things (BIoT), ze względu na znaczne spektrum jej wykorzystania w budynkach [3, 4].

Budynki usytuowane na terenach zurbanizowanych mogą być wyposażone w systemy automatyzacji zintegrowane w jedną platformę z intuicyjną obsługą. Takie systemy mogą umożliwić zintegrowane zarządzanie ochroną przeciwpożarową, ogrzewaniem, wentylacją i klimatyzacją, oświetleniem oraz monitoringiem wideo. Odniesienie tych działań do skali miast, coraz większych, zatłoczonych, zanieczyszczonych, umożliwia efektywniejsze wykorzystywanie i gospodarowanie zasobami oraz poprawia jakość życia mieszkańców. Są komponentem infrastruktury technicznej wdrażanych założeń idei inteligentnych miast [5]. Budynki spełniające założenia budownictwa zrównoważonego (ZR) i gospodarki cyrkulacyjnej (GC) (zw. budownictwem o zamkniętym obiegu (BZ)), wyposażone w systemy automatyki oraz sterowania nazywane są „inteligentnymi budynkami zrównoważonymi” (IBZ) [7]. Postrzeganie

inteligentnego budowania i zrównoważonego rozwoju (ZR) może się różnić w zależności od zawodu lub branży grup użytkowników budynków [8] oraz pełnionych funkcji i lokalizacji budynków, a także wieku budynku (nowy czy modernizowany) oraz zasobności portfela inwestora. Mimo tych różnic muszą one spełniać podstawowe założenia obowiązujących koncepcji społeczno-gospodarczych. IBZ znajdują zastosowanie w budownictwie mieszkaniowym i użyteczności publicznej, tj. biurach, bankach, szpitalach, szkołach itd. W artykule podjęto problematykę oceny porównawczej, według podstawowych kryteriów budownictwa zamkniętego, budynku w wersjach: energooszczędnej – standard sprzed WT2021, pasywnego (standard WT2021 [9]) oraz pasywnego z uwzględnieniem zasad budownictwa zrównoważonego, wyposażonego w inteligentne systemy sterowania. Zastosowano metody oceny cyklu życia LCA (ang. *Life Cycle Assessment*) [10], LCC (*Life Cycle Cost*) [11] oraz analizę wielokryterialną. Zastosowana metodyka badań, uzyskane wyniki i ich analiza mogą być wykorzystywane w praktyce podejmowania decyzji w różnych uwarunkowaniach polityczno-gospodarczych oraz społecznych.

Kierunki rozwoju budownictwa kubaturowego

Zjawiska i inne czynniki powodujące zmiany w uwarunkowaniach polityczno-społecznych, gospodarczych, rozwój techniki oraz technologii skłaniają do poszukiwania wdrażania nowych opcji w zakresie rozwiązań materiałowych, konstrukcyjnych oraz wyposażenia w instalacje obiektów budowlanych, w szczególności budynków. Jednym z nich był kryzys naftowy, który rozpoczął się w 1973 roku i sprawił, że rozpoczęto poszukiwania innych źródeł energii. Z kolei rozwój

budownictwa zrównoważonego nie byłby możliwy, gdyby nie zwiększająca się świadomość dotycząca wpływu budownictwa na środowisko naturalne. Budownictwo jest odpowiedzialne za ok. 40% globalnej emisji CO₂. Dwutlenek węgla powoduje m.in. wzrost średniej temperatury powietrza o 0,2°C na dekadę, topnienie lodowców i zmniejszenie pokrywy lodowej, a także trudności w funkcjonowaniu wielu gatunków roślin oraz zwierząt. Wprowadzane zmiany mają na celu przede wszystkim zmniejszyć emisję CO₂ w fazie użytkowania obiektu budowlanego, której udział wynosi aż 82% [12]. Stąd też zwrócenie uwagi na tzw. ślad węglowy i jego minimalizacja w cyklu życia produktu (budynek). Wprowadzane są zmiany w warunkach technicznych, w szczególności w odniesieniu do energochłonności, m.in. maksymalnego zapotrzebowania budynku na energię pierwotną oraz wartości współczynników przenikania ciepła określonych przegród [13]. W budynku, który można aktualnie uznać za energooszczędny, zużycie energii musi być mniejsze niż 50–70 kWh/(m²·rok). Wartość ta jest około trzy razy mniejsza od obowiązujących przed laty standardów [14]. Ograniczenie zużycia energii w budynkach rozwinęło budownictwo pasywne. Koncepcja budynków pasywnych wymusza minimalizację zużycia energii, zapewniając komfort cieplny wewnątrz budynku przy jak najmniejszym zużyciu nieodnawialnych źródeł energii. Zapotrzebowanie na energię użytkową musi być mniejsze niż 15 kWh/(m²·rok) [13]. W budynku powinny być zamontowane ekologiczne źródła energii, tj. pompa ciepła, panele fotowoltaiczne bądź kolektory słoneczne, a także wentylacja mechaniczna z odzyskiem ciepła. Zmniejszanie zapotrzebowania na energię skutkuje mniejszymi kosztami eksploatacji budynku i ogranicze-

niem emisji szkodliwych substancji dla środowiska naturalnego. To ostatnie powinno dotyczyć rozwiązań innowacyjnych w materiałach izolacji termicznej, jak również innych stosowanych w sposób masowy do budowy przegród obiektu. Rozwój inżynierii materiałowej przynosi nowe, lepsze rozwiązania, np. płyty poliizocyanuratowe PIR. Zmiana układu funkcjonalnego może polepszyć komfort cieplny mieszkańców dzięki wykorzystaniu ciepła z promieniowania słonecznego. Zabiegi te zmierzają do zapewnienia samowystarczalności energetycznej budynku. Wzrasta koszt budowy, lecz niskie bądź nawet zerowe koszty utrzymania rekompensują poniesione nakłady początkowe [11].

Koncepcja samowystarczalności budynków obejmuje także niezależność od zewnętrznej infrastruktury zaopatrującej w wodę oraz odbierania ścieków, kanalizacji burzowej, a nawet w zakresie produkcji żywności. Przykładem jest rozwój tzw. earthshipów (dom pasywny zbudowany z naturalnych materiałów i surowców pozyskanych z recyklingu – pomysł amerykańskiego architekta Michaela Reynoldsa) [15]. W dbałości o przyszłość naszej planety konieczne stało się wdrażanie koncepcji zrównoważonego rozwoju, która nie umniejszałaby szans na zaspokojenie potrzeb przyszłych pokoleń. Koncepcja ta obejmuje trzy główne aspekty: ekonomia, środowisko i społeczeństwo. Już na etapie planowania oraz projektowania inwestycji uwzględniany jest cały cykl życia obiektu budowlanego, w tym zapotrzebowanie energii i koszty. Ze względu na środowisko budynki są projektowane z uwzględnieniem ich wpływu na otoczenie, na przyrodę, na nieodnawialne zasoby [16, 17]. Badany jest wpływ obiektu na wszystkich etapach, od produkcji materiału do rozbiórki budynku (metoda LCA [10]). Dobór materiałów budowlanych i metod realizacji musi spełniać wymogi minimalizacji emisji szkodliwych substancji do wody, gruntu, powietrza. Budynki zrównoważone (zw. też ekologicznymi lub zielonymi) powinny zapewniać dobry stan zdrowia fizycznego i psychicznego mieszkańców. Przy ocenie brane pod uwagę są takie czynniki jak hałas, emisja substancji (np. pyłów) i wibracje. Z kolei koncepcja gospodarki cyrkulacyjnej, a w konsekwencji budownictwa zamkniętego skutkuje dbałością w zagospodarowaniu odpadów, stosowaniu wyrobów z recyklingu itd. [18]. Rozwój i wdrażanie coraz nowszych technologii przez sektor ICT umożliwiły powstanie tzw. inteligentnych budynków (ang. *smart building*). Inteligentne budynki są wyposażone w czujniki, które zbierają dane i wymieniają je między sobą, aby dostosować pracę do zmieniającego się otoczenia oraz potrzeb mieszkańców. Wśród systemów znajdujących się w budynkach możemy wyróżnić systemy sterowania: ogrzewaniem, oświetleniem, alar-

mowy i monitoringu, przeciwpożarowy i inne. W biurach instalowane są także systemy kontroli dostępu. W inteligentnych budynkach są stosowane systemy pogodowe, regulujące temperaturę pomieszczeń i natężenie oświetlenia na podstawie danych metrologicznych, a także złożone systemy personalizacji, które podejmują decyzje w zależności od tego, jaka osoba znajduje się aktualnie w pomieszczeniu [19].

Jakkolwiek wyposażanie budynków w systemy inteligentnego sterowania nie jest jeszcze powszechne ani kompleksowe, to wyniki badań ankietowych wykonanych przez M. Maliga zawarte w [20] wskazują na duże zainteresowanie nimi. W szczególności wymieniane są: sterowanie ogrzewaniem, system alarmowy, czujniki dymu automatycznie aktywujące zraszacze, sterowanie oświetleniem, zdalny monitoring, automatyczne nawadnianie roślin w ogrodzie, sterowanie klimatyzacją, system wielostrefowego nagłośnienia, samoczynnie opuszczające się rolety. Do najczęściej wymienianych cech należały: możliwość sterowania budynkiem za pomocą urządzeń mobilnych (głównie smartfonów), ale też nowoczesna architektura budynku i zastosowanie materiałów o najwyższej jakości. Ankietowani wymieniali również negatywne cechy, które według nich w przyszłości mogą stać się źródłem problemów. Było to m.in. połączenie budynku z siecią internetową, które może skutkować naruszeniem bezpieczeństwa przez osoby trzecie, a także bardzo duży stopień skomplikowania urządzeń, który wiąże się „z długim czasem szukania usterki i wysokimi kosztami naprawy”. Obecnie za najbardziej przyjazne dla środowiska są uważane i rozwijane budynki inteligentne zrównoważone. Łączą one inteligentne wyposażenie z zasadami zrównoważonego rozwoju wdrażanymi podczas ich projektowania, realizacji i eksploatacji. Projektowane nowe budynki, a nawet te modernizowane, uwzględniają też zasady budownictwa zamkniętego, z wyrobów trwałych, ponownie użytych i z recyklingu [18]. Przedstawiona charakterystyka kierunków rozwoju w projektowaniu i realizacji budynków nie uwzględnia, z powodu celu prezentowanych tu badań, wielu innych zagadnień, jak rozwój materiałów budowlanych, rozwiązań konstrukcyjnych, technologii budowania, systemów organizacyjnych oraz metod zarządzania realizacją obiektów budowlanych.

Metodyka badań

W standardzie budynku zrównoważonego inteligentnego energooszczędność stanowi jego podstawową cechą. Dlatego też punktem wyjścia w przeprowadzonej analizie porównawczej było odniesienie się do energooszczędnych budynków standardowych.

Przyjęta metodyka badań obejmuje następujące etapy:

1. Wybór typowego budynku zw. bazowym, zrealizowanego przed 2021 r. (spełniającego ówczesne wymagania techniczne i energetyczne).
2. Przeprojektowanie budynku bazowego na budynek spełniający standardy budynku pasywnego i ekologicznego. W tym celu zmodernizowano rozwiązanie materiałowe przegród oraz dobrano urządzenia instalacji energetycznych (wykorzystując program ArCADia-Termocad). Tak zaprojektowany budynek można zakwalifikować do grupy budynków zrównoważonych, realizowanych zgodnie z zasadami budownictwa zrównoważonego (zamkniętego). W projekcie uwzględniono preferencje inwestorów i użytkowników na podstawie wyników przeprowadzonej ankiety [20].
3. Wyposażenie nowej wersji budynku w urządzenia zapewniające standard budynku inteligentnego (uwzględniając preferencje podane w ankiecie [20]).
4. Ocena wszystkich wariantów badanego budynku pod względem:
 - energetycznym [9],
 - środowiskowym, z zastosowaniem metody LCA i obliczeniem wskaźnika Ecopoint [10],
 - ekonomicznym, z uwzględnieniem kosztów cyklu życia LCC [21].
5. Wielokryterialna analiza rozwiązań metodą wskaźników syntetycznych [22] i AHP [23].
6. Dyskusja i wnioski.

Badania przeprowadzono na podstawie analizy literatury, biorąc pod uwagę trendy rozwojowe w budynkach, wyniki badań ankietowych oraz wyniki obliczeniowe analizy porównawczej trzech wariantów przykładowego budynku wielorodzinnego analizowanego w [20]. Badania ankietowe szczegółowo opisane w pracy dyplomowej M. Maliga [20] wykonano w roku 2021, na dwóch etapach: 1 – za pomocą ankiety internetowej, mając na celu badanie opinii społecznej (115 osób) oraz 2 – ankiety skierowanej do 57 osób związanych z branżą budowlaną. Otrzymane wyniki z przeprowadzonych badań w pracy pozwalają na ocenę możliwości rozwoju budownictwa zrównoważonego inteligentnego.

Wyniki badań i ich analiza

Charakterystyka rozwojowych wersji budynku

Jako bazowy – wersja I wybrano budynek mieszkalny wielorodzinny, czterokondygnacyjny, podpiwniczony. Dokumentację techniczną budynku pozyskano z Biuletynu Informacji Publicznej [24]. Rozwiązanie konstrukcyjno-materiałowe budynku typowe: stan zero żelbetowy, ściany nośne z pustaków, z betonu komórkowego 0,35 (zewn. nieocieplone o grub. = 36,5 cm i $U = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$), ściany działowe z betonu komórkowego odmiany 0.6.



Tab. 1. Zestawienie porównawcze rozwiązań badanych wariantów budynku; źródło: opracowanie własne

Wariant	Ściany zewn.	Stropy	Okna	Źródła ciepła	Instalacje inteligentne
WI	nieocieplone $U=25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	ocieplone	dwuszybowe	kocioł na gaz	brak
WII	ocieplone $U = 0,14 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	jw.	trzeszybowe	wentylacja mech. z odzyskiem ciepła; pompy ciepła z wymiennikiem grunt; panele fotowoltaiczne	brak
WIII	ocieplone jak w WII	jw.	jak w WII	jak w WII	intelig. systemy sterowania

Stropy z płyt kanałowych, o grub. 24 cm z ociepleniem stropu nad piwnicą i pod nieogrzewanym poddaszem. Konstrukcja dachu drewniana krokwiowo-płatwiowa, kryta blachodachówką. Wentylacja w budynku grawitacyjna. Instalacje sanitarne podłączone do sieci miejskiej. Źródło ciepła stanowi dwufunkcyjny kocioł gazowy (c.o. i c.w.u.). Okna dwuszybowe o $U = 1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, drzwi o $U = 2,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Proponowane przeprojektowanie ww. budynku (wersja II) polega głównie na wdrożeniu zasady minimalizacji zapotrzebowania na energię. Użyte materiały budowlane w budynku bazowym można przyjąć za właściwe w kontekście zasad ZR. Zastosowane zmiany to: ocieplenie ścian zewnętrznych styropianem (uzyskując wsp. przenikania ciepła $U = 0,14 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), zwiększenie warstwy i zmiana styropianu oraz wełny w ocieplonych stropach (o lepszych parametrach cieplnych), wymiana okien na trzeszybowe o $U = 0,79 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ i drzwi o $U = 0,67 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, zastosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła. Źródłem ciepła są 3 pompy ciepła (po 15 kW każda) z wymiennikiem gruntowym oraz panele fotowoltaiczne, o mocy 64,5 kWp, zabezpieczające energię do zasilania urządzeń elektrycznych w domu, w tym rekuperatora i gruntowej pompy ciepła. Wariant III budynku to wariant II doposażony w systemy oraz urządzenia inteligentne. Są to systemy do sterowania oświetleniem, ogrzewaniem i wentylacją, oraz symulacji obecności, przeciwwłamaniowy, czujniki dymu, niektóre ze zdalną regulacją. W tab. 1. zestawiono najważniejsze rozwiązania badanych wersji budynku.

Ocena i analiza energetyczna wariantów budynku

Ocena energetyczna budynku została wykonana na podstawie wyników przeprowadzonego modelowania w celu właściwego doboru urządzeń i źródeł energii, za pomocą programu ArCADia-Termocad 7.5. Zastosowane algorytmy obliczeniowe są zgodne z obowiązującymi wytycznymi i aktualnymi przepisami ministerialnymi [9]. W tab. 2. zestawiono zapotrzebowanie na energię poszczególnych wariantów budynku. W nawiasach przedstawiono wartości wskaźników dla ewentualnego zastosowania dodatkowo paneli fotowoltaicznych w wariantach II/III.

Wariant I nie spełnia podwyższonych minimalnych wymagań, określonych w WT2021, ponieważ był projektowany przed 2021 r. Porównanie wskaźników energetycznych wariantów budynku z dwóch kolejnych okresów obowiązywania wymagań w zakresie energooszczędności wskazuje na duże oszczędności w zapotrzebowaniu i zużyciu energii w budynku dzięki zaostrzeniu przepisów. Istnieją duże możliwości obniżania wartości EP, a tym samym zmniejszenia korzystania ze źródeł energii nieodnawialnej. Ocieplenie budynku i zamontowanie wentylacji mechanicznej zmniejszyło także wskaźnik EU o ponad połowę. Budynek można uznać za niskoenergetyczny [25].

Należy dodać, że wydajność gruntowych pomp ciepła jest bardzo duża i wynosi od 300 do 400%. Oznacza to, że z 1 kWh energii elektrycznej dostarczonej do pompy możemy wytworzyć 3–4 kWh ciepła. Instalacja paneli fotowoltaicznych pozwoli w pierwszych latach działalności zredukować niemal do zera roczne koszty energii dostarczanej do budynku. Natomiast w późniejszych latach

część energii będzie musiała zostać dopięta z powodu spadku efektywności paneli. W analizie założono, że z każdym rokiem wydajność paneli będzie spadała o 0,7%, a wykorzystanie energii w ciągu dnia będzie wynosiło 30% [20]. W obliczeniach nie uwzględniono instalacji chłodzenia dzięki zastosowanej wentylacji mechanicznej. W wariantach II emisja CO₂ zmniejszyła się prawie o 95%, a wskaźnik UOZE zmienił się z 84,76% na 100%. W analizie wariantu II i III założono, że zapotrzebowanie energetyczne w nich będzie takie samo, pomimo że III jest wyposażony w inteligentne systemy sterowania. Koszty energii wygenerowane przez inteligentne systemy i urządzenia są niewielkie, a oszczędności uzyskane przez inteligentne rozwiązania trudne do oszacowania. Niektórzy producenci szacują, że oferowane systemy „inteligentnego” oświetlenia pozwalają zaoszczędzić od 3 do 17% zużycia energii. W przypadku „inteligentnego” ogrzewania oszczędności są szacowane nawet na 40%. Informacje te przekazywane są przez producentów oferujących przewodowe urządzenia, które są znacznie droższe i oferują więcej funkcji. W przypadku bezprzewodowych urządzeń obecnych w budynku III oszczędności zależą głównie od mieszkańców. Przy umiejętnym dostosowaniu działania inteligentnych systemów możemy oczekiwać zmniejszenia zapotrzebowania na energię, w przeciwnym razie – może nawet wzrosnąć. Zgodnie z koncepcją Smart City 3.0 [7] mieszkańcy są nie tylko beneficjentami, ale również inicjatorami i kreatorami działań. To od mieszkańców będzie zależało, jak duże oszczędności przyniosą i jak bardzo podniosą komfort przebywania w budynku.

Tab. 2. Porównanie zapotrzebowania na energię wariantów budynku; źródło: opracowanie wg [20]

Charakterystyki energetyczne	Symbol	Jednostki	Wariant I	Wariant II i III	MaxWT2021
Energia użytkowa	EU	kWh/(m ² ·rok)	95,6	42,7	-
Energia końcowa	EK	kWh/(m ² ·rok)	134,6	22,4	-
Energia pierwotna	EP	kWh/(m ² ·rok)	151,3	10,3 (0)	65
Emisja CO ₂	ECO2	t CO2/(m ² ·rok)	0,02741	0,00116	-
Udział odnawialnych źródeł energii	UOZE	%	0	84,76 (100)	-

EU – energia efektywnie wykorzystywana do ogrzewania i wentylacji pomieszczeń oraz przygotowywania ciepłej wody użytkowej;
 EK – j.w. dostarczana do budynku, obliczana dla standardowych warunków klimatycznych i standardowych warunków użytkowania i jest miarą efektywności energetycznej budynku i jego techniki instalacyjnej;
 EP – EK z uwzględnieniem dodatkowych nakładów nieodnawialnej energii pierwotnej na dostarczenie do granicy budynku.

Tab. 3. Zestawienie kosztów cyklu życia wariantów budynku; źródło: opracowanie własne wg [20]

Etap	Wariant I	Wariant II	Wariant III
	Koszty [zł]		
Przygotowanie i programowanie	461 304	475 155	477 518
Projektowanie i planowanie	237 472	269 118	274 435
Budowa	5 238 368	6 007 844	6 139 125
Koszty użytkowania	5 494 834	3 067 874	3 067 874
Koszty utrzymania	221 794	415 485	439 354
Cały cykl życia budynku	11 653 772	10 235 476	10 398 306

Ocena i analiza ekonomiczna wariantów budynku

Analiza ekonomiczna polega na oszacowaniu kosztów cyklu życia LCC trzech wariantów budynku. W tab. 3. zestawiono planowane koszty, począwszy od fazy przygotowania i programowania (w tym badania geotechniczne, zakup działki), analizy oddziaływania budynku na środowisko (na podstawie danych rynkowych), projektowania i planowania (wg wytycznych ministerialnych [26]), budowy (wg kalkulacji szczegółowej [11]), eksploatacji przez okres 30 lat (zgodnie z rozporządzeniem [26]), obejmującej użytkowanie i utrzymanie.

Koszty użytkowania budynku to koszty energii elektrycznej, gazu, wody i odprowadzania ścieków, podatku od nieruchomości, ubezpieczenia, gospodarowania odpadami komunalnymi, sprzątnięcia, zarządzania nieruchomością i przeglądów technicznych (przyjęte dla warunków Krakowa [20]). Koszty utrzymania obejmują wydatki na okresowe remonty budynku, policzone jako procent od kosztów wykonania wybranych elementów/rób [27].

Termomodernizacja wariantu bazowego budynku zdecydowanie obniżyła koszty cyklu życia obiektu dzięki zmniejszeniu kosztów użytkowania (energii), ale koszt budowy II i III wariantu wzrósł (materiały izolacyjne, instalacje odzysku i pozyskiwania energii cieplnej, robocizna i w III wersji – inteligentne systemy sterowania). Obliczono, że w przypadku wariantu II okres zwrotu zwiększonych nakładów początkowych nastąpi po 12 latach. Dla wariantu III – budynku zrównoważonego inte-

ligentnego będzie on równy 14 lat. W analizie ekonomicznej budynku brano pod uwagę 30-letni okres jego eksploatacji. Praktyka wskazuje, że ten etap cyklu życia obiektu trwa znacznie dłużej. Uwzględniając ten fakt, można uzyskać większe oszczędności (korzyści). Prawdopodobnie po 30 latach konieczna będzie wymiana pompy ciepła i paneli fotowoltaicznych. Koszt tych urządzeń to obecnie około 0,5 mln zł. Mimo dodatkowych wydatków zarówno wariant II, jak i III budynku byłby wciąż korzystniejszym rozwiązaniem z punktu widzenia analizy LCC. Oszczędności po 50 latach wyniosłyby kilka milionów złotych. Na koniec trzeba zauważyć, uwzględniając aktualne uwarunkowania gospodarcze, jak duże jest ryzyko w kalkulacji kosztów LCC w szczególności w odniesieniu do fazy eksploatacji. Jakkolwiek koszt inwestycji stanowi podstawowe kryterium podejmowanych decyzji, to w realizowanej koncepcji gospodarczo-społecznej nie jest podstawowym kryterium oceny produktów, w tym obiektów budowlanych.

Ocena i analiza środowiskowa

Przeprowadzając analizę środowiskową budynku, uwzględniono jedynie materiały, które będą wykorzystywane w największych ilościach. Ich wpływ na środowisko został wyrażony przez 11 wskaźników kategorii oddziaływań na środowisko. Obliczenia syntetycznego wskaźnika Ecopoint (Ep) dokonano według zasad podanych w normach [10]. Ilość każdego materiału została przeliczona na deklarowaną jed-

nostkę odniesienia znajdującą się w deklaracjach EPD [28]. Ilość materiałów przemnożono przez wartości wskaźników na jednostkę. Następnie znormalizowano wartości i przemnożono przez wagi parametrów. Ostatnim krokiem było zsumowanie otrzymanych wartości dla wszystkich materiałów, otrzymując syntetyczny wskaźnik Ecopoint [20]. W tej analizie nie uwzględniono materiałów i wyposażenia budynku w instalacje budowlane: sanitarne, energię elektryczną i ciepłą. Jest to upraszczające założenie. Wariant II budynku różni się od wariantu III jedynie zamontowanymi inteligentnymi instalacjami. Pozostałe materiały zastosowane do budowy obu wariantów budynku były takie same, dlatego wykonano wspólną analizę środowiskową. W tab. 4. przedstawiono wskaźniki Ecopoint dla poszczególnych wariantów budynku oraz dla wybranych materiałów budowlanych, w tym izolacyjnych, których zużycie jest zdecydowanie większe w wariantach II i III.

Wyniki analizy środowiskowej wykazują, że korzystniejszy jest wariant I budynku. Jego wskaźnik Ecopoint (Ep) wyniósł 21,67 i jest mniejszy o 0,44 od wskaźnika wariantów II i III. Powodem wzrostu Ep jest większa ilość zużytych materiałów izolacyjnych: styropianu i wełny skalnej. Aby ograniczyć ilość potrzebnego materiału, a tym samym ilość szkodliwych substancji wytwarzanych w całym cyklu życia materiału, zwiększono grubość ocieplenia tylko do wartości, przy której współczynnik przenikania ciepła spełniał obowiązujące od 2021 r. ograniczenia. Wysokie Ep mają też

Tab. 4. Wskaźniki Ecopoint dla wariantów budynku i poszczególnych materiałów; źródło: opracowanie własne wg [20]

Lp.	Wariant I		Wariant II i III	
	Wskaźnik Ecopoint dla całego budynku			
	21,67		22,11	
Wskaźnik Ecopoint poszczególnych elementów budynku				
	Materiał	Ecopoint	Materiał	Ecopoint
1	Beton komórkowy	5,47	Beton komórkowy	5,47
2	Błoczek żwirowy	1,76	Błoczek żwirowy	1,76
3	Styropian	0,13	Styropian grafitowy	0,30
4	Wełna mineralna	0,05	Wełna mineralna	0,28
5	Płyty kartonowo-gipsowe	0,26	Płyty kartonowo-gipsowe	0,26
6	Deski podłogowe	-0,01	Deski podłogowe	-0,01
7			Styropian	0,04

Tab. 5. Kryteria oceny i ich wartości; źródło: opracowanie własne wg [20]

Kryterium	Opis	Typ	Waga	Wartości kryteriów		
				Wariant I	Wariant II	Wariant III
K1	koszty eksploatacji, zł	destymulanta	0,35	5 716 628	3 483 359	3 507 228
K2	komfort, pkt 1–5	stymulanta	0,22	1	2	5
K3	wskaźnik odnawialnych źródeł energii, %	stymulanta	0,14	0,01	92,7	92,7
K4	koszt realizacji, zł	destymulanta	0,12	5 937 144	6 752 117	6 891 078
K5	Ecopoint, pkt	destymulanta	0,09	21,67	22,11	22,11
K6	bezpieczeństwo, pkt 1–5	stymulanta	0,06	3	3	3
K7	czas budowy, pkt 1–5	destymulanta	0,02	2	4	5

materiały wykorzystywane w największych ilościach w budynku: płyty kanałowe, beton komórkowy i bloczki żwirobotonowe. W obliczeniach Ep nie uwzględniono stolarki okiennej i drzwiowej, gdyż deklaracje EPD ich producenta były niedostępne, a wartości z deklaracji innych producentów mogłyby zniekształcić wyniki. W wariantach II i III zastosowano okna i drzwi o znacznie niższym współczynniku przenikania ciepła, mogło to spowodować konieczność stosowania materiałów i procesów mniej przyjaznych dla środowiska niż w wariantach I. W przypadku uwzględnienia stolarki wskaźnik Ecopoint dla wariantu II budynku byłby prawdopodobnie jeszcze większy. Założeniem analizy środowiskowej jest identyfikacja „szkodliwych” materiałów i ich zamiana na bardziej przyjazne dla środowiska. W przypadku rozwiązań materiałowych budynku przyjętego jako bazowy nie było takiej potrzeby, gdyż zastosowane w nim materiały należą do obecnie uważanych za właściwe środowiskowo. Więźba dachowa jest wykonana z drewna, jest to materiał przetworzony tylko w niewielkim stopniu. W trakcie swojego cyklu życia może również redukować szkodliwe substancje. Ich redukcja może być nawet większa niż ilość wytworzonych szkodliwych substancji. Potwierdzają to deski podłogowe, w przypadku których wskaźnik Ep ma wartość ujemną. Stropy są wykonane z płyt kanałowych, których produkcja w całości odbywa się w zakładzie prefabrykacji. Na budowie wykonywany jest jedynie montaż, dzięki czemu ilość wytworzonych odpadów podczas całego procesu jest niewielka. Do materiałów przyjaznych dla środowiska zaliczany jest również beton komórkowy, wykorzystywany do budowy ścian konstrukcyjnych i działowych budynku. Warto również wspomnieć, że analiza środowiskowa uwzględnia fazę recyklingu produktu, w której wartość wskaźnika jest ujemna. Oznacza to, że do

ponownego przetworzenia produktu będzie potrzebna mniej zasobów i zostanie wytworzona mniejsza ilość substancji szkodliwych dla środowiska. Materiały, które powstaną w ten sposób, mogą zostać wykorzystane ponownie do strawiania budynków bądź w innych gałęziach gospodarki. Biorąc pod uwagę jedynie wskaźnik Ep, może się wydawać, że zmiany między bazowym wariantem a zrównoważonym i zrównoważonym inteligentnym sprawiły jedynie, że budynek stał się bardziej szkodliwy dla środowiska. W kontekście wpływu całego cyklu życia materiałów na środowisko jest to prawda, lecz w kontekście całego cyklu życia budynku stwierdzenie to jest błędne. Wykorzystanie większej ilości materiałów pozwoliło na zmniejszenie zapotrzebowania energetycznego budynku i tym samym na zmniejszenie ilości szkodliwych substancji wytworzonych w fazie eksploatacji budynku. Wartość wskaźnika EP w pierwszym roku eksploatacji zmalała z 151,3 kWh/(m²·rok) na 0 kWh/(m²·rok). Dzięki zastosowaniu pompy ciepła i paneli fotowoltaicznych wskaźnik odnawialnych źródeł energii wzrósł z 0% do 92,7%. Oznacza to, że w 30-letnim cyklu życia budynku 92,7% energii będzie pochodzić z odnawialnych źródeł, które są przyjazne dla środowiska naturalnego.

Ocena rozwiązań za pomocą analizy wielokryterialnej

Zastosowano dwie metody oceny: wskaźników syntetycznych [22] i AHP [23]. Spośród wielu możliwych kryteriów oceny wybrano 7, kierując się wynikami przeprowadzonej ankiety [20]. Wartości wag kryteriów określono metodą porównania par w macierzy. W tab. 5. zestawiono kryteria oceny, wartości ich wag i wartości kryteriów/parametrów poszczególnych wariantów budynku.

W metodzie wskaźników syntetycznych sprowadza się wartości kryteriów do wartości niemianowanych [22, 20]. Obliczono kilka

wskaźników syntetycznych dla sprawdzenia zbieżności wyników. Najwyższą wartość we wszystkich rodzajach uzyskał wariant III. W metodzie AHP przeprowadza się obliczenia metodą porównywania par wg algorytmu Saaty'ego [23]. Wariant III także uzyskał najwyższe miejsce w rankingu (tab. 6.).

Zarówno w pierwszej, jak i drugiej metodzie analizy decydujący wpływ miały wagi poszczególnych kryteriów. W badaniu przeprowadzonym w rozdz. 2. [20] ankietowani wskazali koszty eksploatacji i komfort jako najważniejsze kryteria. W przypadku budynku inteligentnego zrównoważonego i budynku zrównoważonego koszty eksploatacji były bardzo podobne. Z kolei komfort uzyskał znacznie wyższą wartość oceny dla budynku inteligentnego zrównoważonego w porównaniu do pozostałych. W analizie wielokryterialnej należy pamiętać, że o wynikach decydują wagi kryteriów, które nie zawsze mają charakter obiektywny i są uzależnione od istniejących uwarunkowań. Natomiast trzeba także uwzględniać w początkowej fazie analizy wartości kryteriów, których poziom zależy od ograniczeń prawnych, wytycznych itd.

Podsumowanie i wnioski

W podsumowaniu przeprowadzonych badań należy podkreślić, że ujęcie w tej analizie budynku zw. tu bazowym, niespełniającego ostatnich wytycznych WT2021, daje jednak wiele istotnych informacji w zakresie rozwoju budynków zrównoważonych inteligentnych. Główny wniosek to poszukiwanie nowych materiałów, takich, aby minimalizować szkodliwy wpływ na środowisko podczas ich produkcji, zmniejszać ich niezbędne zużycie w budynku, zapewniać większą trwałość itp. Pomimo że badany budynek był wykonany z materiałów należących do grupy preferowanych w kontekście ochrony środowi-

Tab. 6. Zestawienie ocen wariantów budynku; źródło: opracowanie własne wg [20]

Wariant	Metoda wskaźników syntetycznych					Metoda AHP
	Wskaźnik multiplikacyjny skorygowany	Wskaźnik sumacyjny skorygowany	Wskaźnik addytywny skorygowany	Średnia harmoniczna ważona	Średnia geometryczna ważona	
W1	1,102E-12	0,523	0,075	0,001	0,159	0,167
W2	1,445E-08	0,818	0,117	0,710	0,768	0,399
W3	4,687E-08	0,967	0,138	0,949	0,960	0,434

Streszczenie: Celem artykułu jest ocena możliwości projektowania oraz realizacji budynków zrównoważonych i inteligentnych. W badaniach dokonano analizy budynku o standardzie zbliżonym do standardu budynku inteligentnego, spełniającego wszystkie wymagania wynikające z zasad projektowania budynków dla bezpiecznego użytkownika oraz zasad budownictwa zrównoważonego, w szczególności pasywnego. Ocena obejmuje cały cykl życia obiektu i następujące grupy kryteriów: energetyczne, środowiskowe, ekonomiczne, w tym techniczne oraz społeczne. Otrzymane wyniki wskazują na duże korzyści, jakie daje wyposażenie budynków zrównoważonych w urządzenia inteligentne, w kontekście oszczędności środowiska naturalnego oraz większego bezpieczeństwa i komfortu w ich użytkowaniu. Zastosowana w pracy metodyka wykorzystuje różne narzędzia badawcze, w tym analizę wielokryterialną, pozwalającą na uwzględnienie w ocenie możliwości rozwoju budynków inteligentnych zmieniających się uwarunkowań społeczno-gospodarczych.

Słowa kluczowe: budynki zrównoważone inteligentne, ocena budynków, LCA, LCC

Abstract: ANALYSIS OF DEVELOPING BUILDINGS WITH A SUSTAINABLE SMART BUILDING STANDARD. The purpose of the paper is to evaluate the possibility of designing and realization of sustainable and smart buildings. The research analyzes a building with a standard close to that of a smart building, meeting all the requirements arising from the principles of designing buildings for safe use and the principles of sustainable construction, in particular passive construction. The evaluation method includes the whole life cycle of the building and the following groups of criteria: energy, environmental, economic, including technical and social. The results obtained show the great benefits of equipping sustainable buildings with smart devices, in the context of environmental savings and greater safety and comfort in their use. The methodology used in this paper, uses a variety of research tools including multi-criteria analysis, allowing to take into account the changing socio-economic conditions in assessing the feasibility of the development of intelligent buildings.

Keywords: sustainable smart buildings, building assessment, LCA, LCC

ska, to konieczność zwiększenia grubości warstw izolacji cieplnej dla poprawy właściwości energetycznych budynku pogorszyła wskaźnik Ecopoint. Uwaga ta dotyczy zarówno produkcji zupełnie nowych materiałów budowlanych, wykorzystując np. nanotechnologie, jak i recyklingu odpadów.

Niewątpliwie realizacja budynków według koncepcji budownictwa pasywnego niesie ze sobą bardzo duże oszczędności w zapotrzebowaniu budynku na energię, a zastosowanie źródeł energii odnawialnej umożliwi ograniczenie, w ogromnym stopniu, korzystania z zasobów nieodnawialnych, w przyszłości zupełnie takie źródła eliminując. Jest realna szansa budowy budynków zeroenergetycznych [29].

Budynki zrównoważone to nie tylko minimalizacja zapotrzebowania na energię, ale także spełnienie wielu innych zasad zrównoważonego rozwoju. To np. oszczędności w zużyciu wody, produkcji ścieków i odpadów, zapewnienie zdrowego powietrza, komfortu w użytkowaniu i przebywaniu w budynku itp. Te zasady spełniane są w tzw. budynkach samowystarczalnych, w tym w eartshipach, w których produkuje się żywność, a buduje „ze śmieci” [15].

Wymienione zasady budowy oraz sprawnie i kompleksowo działające wyposażenie w różnego rodzaju urządzenia oraz instalacje, niosące oszczędności, nie byłoby możliwe bez zastosowania systemów automatyzacji i sterowania. Czynnikiem przyspieszającym rozwój budynków zautomatyzowanych, wyposażonych w najnowsze osiągnięcia techniki oraz technologii informatyczno-komunikacyjnej ICT, są niewątpliwie korzyści z punktu widzenia komfortu i bezpieczeństwa w użytkowaniu (nawet zdalnego sterowania) oraz ochrony środowiska, m.in. poprzez mniejsze zużycie energii, wody. Stąd też kierunek budownictwa inteligentnego nie tylko w odniesieniu do pojedynczego budynku i jego użytkownika, ale także jako budynków miast i osiedli stanowiących element infrastruktury technicznej smart city oraz jego społeczności [7]. Ponadto inteligentne instalacje, zamontowane wewnątrz budynku przy odpowiedniej konfiguracji, mogą być dodatkowym źródłem oszczędności w fazie eksploatacji. Niestety bardzo trudno jest jeszcze, z różnych względów, oszacować wymierne oszczędności. Odnosząc się do budynku zrównoważonego inteligentnego w kontekście przeprowadzonych badań, jest to rozwiązanie o najlepszym wyniku rankingowym, uwzględniającym aktualne preferencje ocen wag kryteriów. W opinii badanej w 2021 r. grupy respondentów (115 osób) najbardziej istotny jest koszt eksploatacji i komfort użytkownika, natomiast świadomość społeczna ujęta w kryterium wpływów środowiskowych mierzona Ekopointem jest zdecydowanie niższa. Mimo przyjęcia pewnych upraszczających założeń wskutek braku doświadczeń ich

budowy na szerszą skalę i braku wiedzy z długoletniego użytkownika można prognozować niedaleką przyszłość ich powszechnej realizacji.

Bibliografia

- [1] Baranowski A., Budownictwo energooszczędne w Polsce – stan i perspektywy, Wydaw. Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2015.
- [2] Niezabitowska E. (red.), Inteligentny budynek. Tom I. Potrzeby użytkowników a standardy inteligentnych budynków. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2005.
- [3] Wang S, Xie J. Integrating Building Management System and facilities management on the Internet. *Autom. Constr.*, 11, 6, 2002, 707–715.
- [4] Alaa M, Zaidan AA, Zaidan BB, Talal M, Kiah LM., A review of smart home applications based on IoT, *J. of Netw. and Comp. Applcat.*, 2017.
- [5] Kuzior A, Sobotka B., Zarządzanie zrównoważonym rozwojem miasta w kontekście idei Smart City, *Fund. VCC, Lublin* 2019.
- [6] Höjer M., Wangel J., Smart sustainable cities: Definition and challenges. *Adv. Intell. Syst. Comput.* 2014; 310: 333–349.
- [7] Radziejowska A., Sobotka B., Analysis of the social aspect of smart cities development on the example of smart sustainable buildings, *Energies*. 2021, <https://doi.org/10.3390/en14144330>.
- [8] To W, Lai L, Lam K, and Chung A., Perceived Importance of Smart and Sustainable Building Features from the Users' Perspective, *Smart Cities*, 2018, <https://doi.org/10.3390/smartcities1010010>.
- [9] <https://www.archipelag.pl/>, dostęp: 7.02.2021.
- [10] PN-EN ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura oraz PN-EN ISO 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne. PKN, Warszawa 2009.
- [11] Plebankiewicz E., Planowanie i szacowanie kosztów cyklu życia budynków biurowych, *Wydawnictwo PK, Kraków* 2019.
- [12] <https://blogs.sweco.pl/>, dostęp: 6.02.2021.
- [13] Rozporządzenie Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 6 września 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (DzU z 2019 r. poz. 1829).
- [14] Tataro, T.; Fedorcak-Cisak, M.; Furtak, M.; Surówka, M.; Steidl, T.; Knap-Miśniakiewicz, K.; Kozak, E.; Kawalec, W. Przegląd przepisów określających minimalne wymagania dotyczące charakterystyki energetycznej budynków, *Centr. Budow. Energooszczędnego, Kraków* 2017.
- [15] <https://doi.org/10.3390/buildings11090377>, dostęp: 12.04.2022.
- [16] Kowalski Z., Kulczycka J., Góralczyk M., *Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA)*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
- [17] Runkiewicz L., Realizacja obiektów budowlanych zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, *Przegląd Budowlany*, 2/2010, 17–23.
- [18] Sagan J., Sobotka A., Analysis of Factors Affecting the Circularity of Building Materials. *Materials*, 14, 7296, 2021, <https://doi.org/10.3390/ma14237296>.
- [19] Sulikowska O., Brzuzo A., Systemy inteligentny dom – nowocześniejsza technologia stosowana w budownictwie, *Biuletyn WAT*, vol. LXVIII, Nr 2, 2019, 71–80.
- [20] Malig Marcin, Analiza techniczno-ekonomiczna i środowiskowa przykładowego budynku jako elementu infrastruktury technicznej inteligentnych miast. Praca magisterska, Promotor Anna Sobotka, AGH, Kraków 2021.
- [21] Dz.U. poz. 1357, *Rozp. MiIR* z dnia 11 lipca 2018 r. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20180001357>, dostęp: 25.05.2022.
- [22] Szwabowski J., Deszcz J., *Metody wielokryterialnej analizy porównawczej: podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań w budownictwie*, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2001.
- [23] Thomas L., Saaty T., Response to Holder's Comments on the Analytic Hierarchy Process, *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 42, No. 10, 1991, 909–914.
- [24] <http://bip.bartoszyce.pl/>, dostęp: 7.05.2021.
- [25] <http://nthssystem.pl/>, dostęp: 15.06.2021.
- [26] Dz.U. 2021 poz. 2458. *Rozp.*, MiRIT dnia 20.12.2021 r., <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20210002458>, dostęp: 25.05.2021.
- [27] Dziadosz A. i in., Łączne koszty budynku w cyklu życia inwestycji budowlanej. W: *Wybrane problemy budownictwa. Konferencja Naukowa KILW PAN oraz KN PZITB*, Wyd. Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2015.
- [28] <https://www.environdec.com/>, dostęp: 20.06.2021.
- [29] Stachowiak E., Budynki efektywne energetycznie jako przyszłość budownictwa. W: *Profesor Halina Koczyk: jubileusz XLV-lecia pracy naukowej i dydaktycznej*, red. M. Basińska (WBiIS) – Poznań, Polska: Systherm D. Gazińska s.j., Poznań, 2018, 67–87.