

mgr inż. Anna Peszek^{1*)}mgr inż. Anna Rumijowska¹⁾prof. dr hab. inż. Henryk Nowak¹⁾

Pionowe systemy zieleni a zużycie energii w budynkach

Vertical greenery systems and the energy consumption of buildings

DOI: 10.15199/33.2015.11.69

Streszczenie. Ze względu na coraz wyższe wymagania w zakresie zużycia energii w budynkach poszukuje się rozwiązań zwiększających izolacyjność cieplną przegród zewnętrznych. Jedną z metod poprawy charakterystyki energetycznej jest zastosowanie pionowych systemów zieleni, które zapewniają wiele korzyści ekologicznych, ekonomicznych i wizualnych. Dzięki nim możliwe jest zmniejszenie efektu miejskiej wyspy ciepła, poprawa bioróżnorodności, a przede wszystkim ograniczenie zużycia energii zarówno na cele grzewcze, jak i chłodzenie. W artykule przedstawiono klasyfikację systemów wegetacyjnych zintegrowanych ze ścianami budynku oraz omówiono wybrane zagadnienia dotyczące ich funkcjonowania. Przytoczono wyniki badań i symulacji energetycznych, których celem była ocena wpływu zielonych ścian na zużycie energii w budynkach.

Słowa kluczowe: ściany zielone, zużycie energii.

Abstract. Due to the increasing energy consumption requirements, there are being sought solutions that could increase the thermal insulation of the building envelopes. One of the methods of improving the energy performance is the use of vertical greenery systems that provide a range of ecological, economical and visual benefits. Thanks to it is possible to mitigate the urban heat island effect, improve biodiversity, and first of all reduce energy consumption both for heating and cooling. The paper presents classification of vegetation systems integrated with building envelopes and some issues relating to their operating mechanisms. There are described results of field experiments and energy simulations that show estimation the impact of the green wall on energy performance in buildings.

Keywords: green walls, energy consumption.

Rozwój miast, w tym powstawanie nowych budynków i zagęszczenie zabudowy miejskiej, w niekorzystny sposób ingeruje w otaczający ekosystem, powodując negatywne zmiany, takie jak: podwyższona temperatura powietrza w centrach dużych miast (tzw. wyspy ciepła); obniżenie wilgotności względnej powietrza; wzrost zanieczyszczeń pyłowych itp. Dodatkowo w miastach brakuje terenów zielonych, które poprawiają jakość powietrza, a także zwiększają retencję wody opadowej, odciążając sieć kanalizacyjną, czy też zmniejszają temperaturę otoczenia [1]. Pozytywny wpływ na tę sytuację może mieć stosowanie zielonych systemów wegetacyjnych zintegrowanych z poziomymi i pionowymi przegrodami budynków. Przykładem są zielone dachy oraz zielone ściany, które są rzadko stosowane w Polsce. Zastosowanie tego typu systemów nie tylko przekłada się na poprawę warunków bytowania ludzi, ze względu na lepszą jakość powietrza czy też korzystny wpływ na samopoczucie, ale także przy odpowiednim doborze systemu może przelożyć się na oszczędności energetyczne.

W artykule omówiono wybrane aspekty technologii zielonych ścian oraz przedstawiono przykładowe badania i symulacje

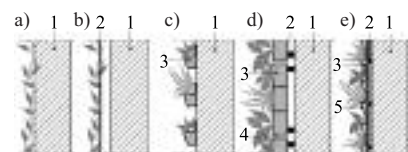
mające na celu ocenę wpływu pionowych systemów zieleni na całoroczne zużycie energii w budynku.

Klasyfikacja pionowych systemów zieleni

Termin zielone ściany odnosi się do wszystkich systemów wykorzystujących roślinność na pionowych powierzchniach budynków [2]. Pionowe systemy zielone różnią się między sobą złożonością konstrukcji oraz rozwiązaniami technologicznymi. Wyróżnia się dwie główne grupy: zielone fasady i ściany żywe [3], co pokazano w tabeli. **Fasady zielone**, to systemy składające się z pnączy, które rosną bezpośrednio na ścianach budynku i tworzą tradycyjną (bezpośrednią) zieloną fasadę (rysunek a, fotografia). Wyróżnia się także fasady pośrednie (rysunek b), w których rośliny pną się po dodatkowych konstrukcjach wsporczych. Odmianą pośrednich fasad zielonych jest zastosowanie roślin wiszących przy ścianach, które tworzą zieloną kurtynę [3], natomiast trzecią grupą są systemy donic mocowanych do budynku (rysunek c).

Klasyfikacja systemów zielonych ścian [3] Vertical greenery systems classification

Zielone ściany				
zielone fasady			ściany żywe	
tradycyjne	pośrednie	system donic przyściennych	system panelowy	system z filcu geotekstylnego



Pionowe systemy zieleni (opis w tekście):
1 – ściana; 2 – konstrukcja wsporcza; 3 – substrat; 4 – panel; 5 – kieszeń z geotekstyną

Vertical greenery systems (1 – wall; 2 – supporting structure, 3 – substrate; 4 – panel, 5 – geotextile pocket)



Zielona fasada bezpośrednia, budynek mieszkalny, Nowa Sól [Fot. A. Rumijowska]
Traditional Green Façade, residential building, Nowa Sól [Photo A. Rumijowska]

Drugą kategorią zielonych ścian są **ściany żywe**. Ich struktura jest znacznie bardziej skomplikowana, gdyż wymagają wykonania dodatkowej konstrukcji nośnej, a samo utrzymanie – większych nakładów pracy i energii. Wyróżnić można system panelowy, kiedy rośliny rosną w modułowych elemen-

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Autor do korespondencji:

e-mail: anna.peszek@pwr.edu.pl

tach wypełnionych substratem (rysunek d) oraz system z geotekstylnej filcu, kiedy rośliny sadzone są w kieszeniach z geowłókniny (rysunek e).

Wymienione systemy ścian zielonych różnią się znacznie między sobą konstrukcją, gatunkami zastosowanych roślin, a także sposobem utrzymania (nawadnianie, nawożenie, pielęgnacja). W Polsce dominują systemy fasad zielonych, natomiast istnieją także realizacje obiektów ze ścianami żywymi [4].

Dobór roślin powinien wynikać z analizy lokalnych ekstremalnych warunków klimatycznych, w tym przede wszystkim temperatury powietrza i prędkości wiatru, a także dostępności promieniowania słonecznego [4]. Badania przeprowadzone na terenie Wrocławia, omówione w pozycji [5], miały na celu ocenę funkcjonowania systemów ścian żywych na terenie Dolnego Śląska. Porównano dwa modele modułowe: retencyjny, wykorzystujący substrat glebowy, oraz ekonomiczny – wykonany na bazie filcu i wełny mineralnej. Przeżywalność roślinności po sezonie zimowym wynosiła 90% w modelu retencyjnym i poniżej 5% w modelu ekonomicznym. Związane jest to z niedostateczną retencyjnością warstwy filcu i wełny mineralnej. Stosowanie lekkich systemów ścian zielonych na bazie materiałów syntetycznych sprawdza się przede wszystkim w krajach o cieplejszym klimacie, w których nie dochodzi do dłuższych okresów występowania temperatury ujemnej, natomiast w Polsce, ze względu na możliwość przemarzania, nie zaleca się stosowania tego typu rozwiązań na zewnątrz budynku [4, 5].

Zasada działania

Roślinność, przez zintegrowanie jej z przegrodami, oddziałuje na zużycie energii przez budynek. Określenie dokładnego jej wpływu jest zagadnieniem trudnym m.in. ze względu zmienność w czasie wysokości czy gęstości roślin. Dodatkowo bardzo trudno jest przenieść wyniki badań prowadzonych na świecie na krajowe warunki ze względu na uwarunkowania klimatyczne, które mają wpływ na rozwój roślin i dobór ich gatunków [6].

Wertykalne systemy zieleni stosowane są przede wszystkim w krajach o klimacie cieplejszym od polskiego, w których służą jako ochrona przed przegrzewaniem się budynku, gdyż roślinność jest wykorzystywana jako element zacieniający, chroniący budynek przed bezpośrednim wpływem promieniowania cieplnego. Obniżenie temperatury jest także wywołane przez pochłanianie energii przez rośliny w procesie trans-

piracji oraz odparowywanie wody zgromadzonej w substracie [3]. Warstwy wchodzące w skład systemu zieleni stanowią izolację termiczną. Przenikanie ciepła przez przegrodę ogranicza zarówno warstwa substratu, jak i roślinności, w tym również prawie nieruchome powietrze znajdujące się pod warstwą liści. Ponadto roślinność ogranicza prędkość wiatru przy fasadzie budynku, co także zmniejsza straty ciepła [6].

Ograniczenie prędkości wiatru

Badania nad izolacyjnością cieplną pionowych systemów zieleni prowadzone były przez zespół badaczy z Holandii [7]. Analizowano: fasadę tradycyjną, pośrednią oraz ścianę żywą modułową, a wyniki porównywano ze ścianą bez roślinności. Badania wykonane we wrześniu i październiku polegały na zbieraniu danych o temperaturze zewnętrznej płaszczyzny ściany budynku oraz prędkości wiatru przy tej ścianie. Najmniejszą różnicę temperatury zaobserwowano przy zielonej fasadzie bezpośredniej, która była o 1,2 °C mniejsza od ściany porównawczej. W przypadku fasady pośredniej różnica ta wynosiła 2,7 °C, a ściany żywej 5 °C. Największa redukcja temperatury jest skutkiem całkowitego zablokowania dostępu promieniowania słonecznego do powierzchni ściany w systemie ściany żywej. Różnica temperatury nie jest duża, co wynika z wykonywania badań w okresie jesiennym, przy niezbyt wysokiej temperaturze zewnętrznej i nieznacznej ilości promieniowania słonecznego. Wpływ systemów zielonych na temperaturę powierzchni przegrody, a tym samym na temperaturę wewnątrz budynku, uzależniony jest od warunków zewnętrznych, przede wszystkim od promieniowania słonecznego [8].

W przypadku redukcji prędkości wiatru przy przegrodzie, w wyniku zastosowania systemów zielonych, najbardziej efektywna okazała się ściana żywa, następnie fasada bezpośrednia, a najmniej efektywna fasada pośrednia. Jak wyliczono w [7], zmniejszenie prędkości wiatru przez zastosowanie ściany żywej spowodowało zmianę oporu przemianowania ciepła po stronie zewnętrznej R_{sc} z 0,04 do 0,13 m²K/W. Zastosowanie systemów zieleni ograniczyło więc strumień ciepła przenikający przez przegrodę.

Izolacyjność cieplna a ograniczenie dostępu promieniowania słonecznego

Symulacje wpływu żywych ścian na oszczędność energii w okresie grzewczym w klimacie Portugalii przeprowadził

Carlos [9]. Jego zdaniem, prawie nieruchoma warstwa powietrza znajdująca się między warstwą liści a przegrodą stanowi dodatkową izolację termiczną i powoduje oszczędność energii w budynku. Jednocześnie warstwa roślinności hamuje dostęp promieniowania słonecznego do przegrody, stąd ograniczone są zyski energii słońca. Z tej przyczyny zastosowanie systemu żywych ścian na fasadach o nieznacznym napromieniowaniu słonecznym w okresie zimowym (północnych, wschodnich i zachodnich) powoduje oszczędności energetyczne. Natomiast w przypadku fasad południowych wprowadzenie roślinności, blokującej dostęp promieniowania słonecznego, prowadzi do większego zużycia energii. Rozwiązaniem może być zastosowanie roślin liściastych, które w okresie zimowym zrzucają liście i umożliwiają nagrzewanie ścian przez promieniowanie słoneczne.

Ograniczenie energii na chłodzenie

Wong w swojej pracy [10], przeprowadzając symulacje obliczeniowe, wykazał znaczne zmniejszenie zapotrzebowania na energię do chłodzenia przez zastosowanie systemów zieleni. Obliczenia wykonano w programie TAS, w którym zamodelowano budynek dziesięciopiętrowy na rzucie kwadratu 30 m x 30 m, w warunkach klimatycznych panujących w Singapurze. W pierwszym wariacie porównano budynek z elewacjami całkowicie pokrytymi zielenią i bez zieleni. Analiza wyników pokazała redukcję zużycia energii o 74% oraz zdecydowane zmniejszenie dobowych wahań temperatury.

W drugim wariacie zamodelowano po 7 okien na każdej z fasad na każdym piętrze i również dokonano obliczeń w przypadku pokrycia takiego budynku roślinnością oraz nieosłoniętego. System zieleni pozwolił na zredukowanie zapotrzebowania na energię wyłącznie o 10,3%, gdyż roślinność zmniejszyła zaledwie jedno ze źródeł ciepła – przenikanie przez ściany. Zdecydowana większość ciepła pochodzi z promieniowania przez okna, które nie zostały osłonięte zielenią.

W trzecim wariacie budynek miał szklaną fasadę i został rozpatrzony w trzech przypadkach: bez zieleni; z zielenią w 50% pokrywającą elewację i całkowicie pokryty zielenią. Analiza wyników wykazała, że zielone fasady redukują zapotrzebowanie na energię do chłodzenia odpowiednio o ok. 12% i 18% dla częściowego i całkowitego pokrycia zielenią.

Zmniejszenie temperatury ściany

Mazzali przeprowadził badania [8] w klimacie śródziemnomorskim na terenie środkowych i północnych Włoch. Porównał wyniki otrzymane w przypadku trzech typów żywych ścian w różnych miejscowościach (Lonigo, Wenecja i Piza). Badania prowadzono od czerwca do września, wybierając dni największego i najmniejszego promieniowania słonecznego. Wyniki ściany zlokalizowanej w Londigo pokazały, że podczas słonecznych dni w przypadku ściany z systemem zieleni wystąpiła redukcja temperatury na zewnętrznej powierzchni warstwy nośnej od 12 °C do 20 °C, natomiast w czasie dni pochmurnych o ok. 5 °C. Ponadto ściana niepokryta zielenią szybciej nagrzewała się w ciągu dnia oraz oddawała ciepło w nocy, co skutkowało dużymi wahaniami temperatury na jej powierzchni. Strumień ciepła przechodzący przez ścianę zieloną w porównaniu z wariantem bez zieleni był o 70 – 80% mniejszy, co wynika przede wszystkim z ograniczenia promieniowania słonecznego, ale także zachodzących procesów ewapotranspiracji.

Badania wariantu z zielenią wykonane w Wenecji wykazały redukcję temperatury ściany o 16 °C w czasie dnia oraz o 6 °C wyższą temperaturę w czasie nocy w porównaniu z wariantem bez roślinności. Wynika z tego, że pokrycie ścian zielenią utrudnia oddawanie ciepła. W tym wariantcie strumień ciepła przenikający przez ścianę zieloną był mniejszy o 50 – 60%.

W trzecim wariantcie, temperatura powierzchni ściany z zielenią była o 12 °C niższa podczas dnia i o 3 °C wyższa w nocy w porównaniu ze ścianą bez roślinności. W dni pochmurne temperatura ścian bez zieleni była wyższa o 2 °C. Badania potwierdziły, że wszystkie rodzaje ścian zielonych zmniejszają wahania temperatury na powierzchni ściany i wykazują jednakową charakterystykę termiczną. Zastosowanie w budynku systemu ściany żywej powoduje zmniejszenie strumienia ciepła, co ogranicza zapotrzebowanie na energię do chłodzenia.

Wpływ na mikroklimat miasta

Roślinność ma duży wpływ nie tylko na kształtowanie mikroklimatu w budynkach, ale także na klimat miast, przede wszystkim o dużym zagęszczeniu ludności i mocno zurbanizowanych. Rośliny w miastach zmniejszają efekt Miejskich Wysp Ciepła. Łagodzą klimat w wyniku procesów

metabolicznych, takich jak fotosynteza, ewapotranspiracja, oddychanie, a także absorpcja minerałów z powietrza i gleby. Zakres procesu chłodzenia zależy od ilości zielonej masy, zawartej głównie w liściach roślin [11]. Zielen w miastach to także tzw. *pluca miasta*. Roślinność uwalnia tlen i absorbuje zanieczyszczenia, przyczyniając się tym samym do poprawy jakości powietrza.

W badaniach prowadzonych przez Tan i in. [11] oceniono wpływ ścian zielonych na temperaturę otoczenia. Dokonano pomiaru temperatury powietrza przed ścianą t_a , temperatury powierzchni betonowej za zieloną fasadą t_s oraz średniej temperatury promieniowania t_{mrt} w przypadku dwóch typów ścian zielonych i porównawczej ściany bez roślinności pomiędzy nimi, narażonej na bezpośrednie działanie promieniowania słonecznego. Następnie usunięto jedną z zielonych ścian i powtórzono badanie. Pomiaru t_a oraz t_{mrt} wykonano w odległości 0,5 – 2,0 m na wysokości 1,7 m. Analiza wyników badań wykazała, że usunięcie zielonej ściany spowodowało wzrost t_s o 6,7 °C, a maksymalna różnica temperatury powierzchni wewnętrznej zwiększyła się z 0,3 °C do 3,8 °C. Ponadto wykazano, że zielona ściana ma wpływ na otaczającą ją powierzchnie – obecność zielonej ściany zmniejszyła fluktuacje temperatury zarówno po stronie zewnętrznej, jak i wewnętrznej, także przy sąsiadującej ścianie betonowej. Po usunięciu jednej ze ścian zielonych, temperatura powierzchni wewnętrznej t_s na nieosłoniętej ścianie betonowej zwiększyła się o 8,7 °C, a także zaobserwowano nieznaczny wzrost temperatury powietrza. Wyniki maksymalnej Δt_a ścian zielonych wnoszą 1,1 °C, a po usunięciu jednej zielonej ściany 1,5 °C, co pokrywa się z wynikami otrzymanymi przez Wonga i in. [12], gdzie zakres temperatury zwiększył się z 0,6 do 1,25 °C. Nastąpiła także znaczna różnica t_{mrt} . Po usunięciu ściany zielonej t_{mrt} wzrosła o 12,8 °C w odległości 0,5 m, a wartości maksymalne wystąpiły z 2 h opóźnieniem. W dalszej odległości od ściany zanotowano również wzrost t_{mrt} począwszy od 1,9 °C do 6,4 °C.

Podsumowanie

Analiza literatury pokazuje pozytywny wpływ zastosowania pionowych systemów zieleni na budynek. Warto uwagi byłoby zastosowanie zielonych ścian w budynkach biurowych, w których, ze względu na wysokie wartości zysków wewnętrznych, więcej energii zużywanej jest na cele chłodzenia niż ogrzewania. W polskich warunkach

klimatycznych pionowe systemy zielone mogłyby znaleźć zastosowanie przy ograniczeniu strat ciepła w okresie zimowym, ale ze względu na występowanie niskich temperatur ograniczona jest stosowność roślin zimozielonych, a tym samym oszczędności energetyczne uzyskiwano by głównie w okresach przejściowych.

Literatura

- [1] Ottelè M.: The Green Building Envelope: Vertical Greening [praca doktorska], Delft University of Technology, Delft 2011.
- [2] Manso M., Castro-Gomes J.: Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* nr 41/2015, s. 863 – 871. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.203.
- [3] Pérez G, Rincón L, Vila A, González JM, Cabeza LF.: Green vertical systems for buildings as passive system for energy savings, *Applied Energy*, nr 88/2011, s. 4854 – 4959. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.06.032.
- [4] Kania A. i in. „Zasady projektowania i wykonywania zielonych dachów i żyjących ścian. Poradnik dla gmin”, Stowarzyszenie Gmin Polska Sieć „Energie Cités”, Kraków 2013.
- [5] Skarżyński D., Pływaczek A., Pęczkowski G., „Ocena funkcjonowania wybranych systemów zielonych ścian zlokalizowanych na obszarach nizinnych Dolnego Śląska”, „Inżynieria Ekologiczna”, nr 39/2014, s. 166 – 175.
- [6] Pérez G., Coma J., Martorell I., Cabeza LF.: Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 39/2014, s. 139 – 165. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.055.
- [7] Perini K., Ottelè M, Fraaij A. L. A., Haas E. M, Raiteri R., Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope, *Building and Environment* nr 46/2011, s. 2287 – 2294. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.05.009.
- [8] Mazzali U., Peron F., Romagnoni P., Pulselli R. M., Bastianoni S.: Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. *Building and Environment* nr 64/2013, s. 57 – 66. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.03.005.
- [9] Carlos J. S.: Simulation assessment of living wall thermal performance in winter in the climate of Portugal. *Building Simulation* nr8/2015, s. 3-11. DOI: 10.1007/s12273-014-0187-2.
- [10] Wong N. H., Tan A. Y. K., Tan P. Y., Wong N. C.: Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings* nr 41/2009, s. 1401 – 1408. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.08.010.
- [11] Tan C. L., Wong N. H., Jusuf S. K.: Effects of vertical greenery on mean radiant temperature in the tropical urban environment. *Landscape and Urban Planning* nr 127/2014, s. 52 – 64. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.04.005.
- [12] Wong N. H., Kwang Tan A. Y., Chen Y., Sekar K., Tan P. Y., Chan D., et al.: Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment* nr45/2010, s. 663 – 672. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.08.005.

Przyjęto do druku: 07.08.2015 r.