



Politechnika Wrocławska

DZIEDZINA: NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE

DYSCYPLINA: ARCHITEKTURA I URBANISTYKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

# Adaptacja budynków do klimatu gorącego i skrajnie suchego

PROPOZYCJE SYSTEMÓW FASADOWYCH  
INSPIROWANYCH NATURĄ, PROJEKTOWANYCH  
ZGODNIE Z ZASADAMI BIOMIMIKRY

mgr inż. arch. Justyna ROMANOWSKA-FRĄSZCZAK

Promotor:

dr hab. inż. arch. Marcin BRZEZICKI, prof. PWr

Słowa kluczowe:

*biomimikra, biomimetyka, projektowanie inspirowane naturą,  
komfort termiczny, klimat gorący i skrajnie suchy,  
zmiany klimatyczne, architektura tradycyjna*

WROCŁAW 2023



# SPIS TREŚCI

---

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ .....	vii
SUMMARY OF THE PHD DISSERTATION .....	ix
PODZIĘKOWANIA.....	xi
OBJAŚNIENIE POJĘĆ.....	xiii
WSTĘP .....	xv
1    WPROWADZENIE .....	2
1.1    Motywacja   Uzasadnienie podjęcia tematu .....	2
1.2    Biomimikra   Innowacyjna dziedzina wiedzy .....	3
1.3    Problem badawczy   Wyzwanie .....	3
1.4    Cel   Zadania badawcze.....	4
1.5    Teza   Pytania badawcze .....	5
1.6    Metodologia badań   Podejście .....	5
1.7    Metodyka   Kolejność działań i schemat badań .....	6
1.8    Struktura pracy   Streszczenie i schemat układu pracy .....	8
1.9    Stan badań   Źródła krajowe i zagraniczne .....	10
1.9.1    Biomimikra.....	10
1.9.2    Architektura – klimat gorący i skrajnie suchy a komfort termiczny .....	15
2    BIOMIMIKRA.....	20
2.1    Wprowadzenie   Filozofia biomimikry .....	20
2.2    Podejście   Założenia i narzędzia .....	20
2.2.1    „Zasady Życia” .....	21
2.2.2    Strategie projektowe .....	24
2.2.3    Taksonomia .....	27
3    ŚRODOWISKO NATURALNE .....	32
3.1    Wprowadzenie   Natura.....	32
3.2    Natura   Model, miara, mentor .....	32
3.2.1    Natura jako model .....	32
3.2.2    Natura jako miara .....	32
3.2.3    Natura jako mentor .....	33

3.3	Geniusz natury   Biom .....	33
3.3.1	Ekosystem – biotop i biocenoza .....	36
3.3.2	Klimat .....	37
3.3.3	Flora i fauna pustynna – adaptacje .....	40
3.4	Kontekst   Pustynie gorące .....	42
3.4.1	Warunki klimatyczne .....	42
3.4.2	Rzeźba terenu i gleby .....	44
4	ŚRODOWISKO ZBUDOWANE .....	48
4.1	Wprowadzenie   Człowiek .....	48
4.2	Komfort termiczny   Stopień zadowolenia człowieka .....	48
4.3	Architektura pustynna   Rozwiązania, techniki i materiały .....	52
4.3.1	Skala miasta .....	52
4.3.2	Architektura rodzima .....	55
4.3.3	Lokalne materiały .....	61
4.4	Wyzwania projektowe   Zalecenia dla projektantów .....	62
5	ADAPTACJA .....	68
5.1	Faza I   Określanie wyzwania .....	68
5.1.1	Ogólne podłoże problemu .....	68
5.1.2	Bezpośrednie okoliczności towarzyszące problemowi .....	69
5.1.3	Poszukiwana funkcja .....	69
5.1.4	Cel projektowania .....	70
5.1.5	Ograniczenia projektowe .....	70
5.1.6	Aspiracyjne cele projektowe .....	71
5.2	Faza II   Odkrywanie .....	72
5.2.1	Morfologia i fizjologia organizmów .....	73
5.2.2	Zbiór zidentyfikowanych mechanizmów adaptacyjnych .....	73
5.2.3	Taksonomia .....	84
5.2.4	Naturalne wzorce projektowe .....	88
6	PROJEKTOWANIE .....	106
6.1	Faza III   Tworzenie .....	106
6.1.1	Proponowane koncepcje inspirowane naturą .....	107
6.1.2	Zawężenie wyboru .....	116
6.1.3	Opis rozwiązań uszczegółowionych .....	117

6.2	Faza IV   Ewaluacja.....	123
6.2.1	Krótkie charakterystyki.....	123
6.2.2	Ogólne porównanie wyników osiągniętych przez rozwiązania.....	124
6.2.3	Podsumowanie wyników.....	125
7	PODSUMOWANIE.....	130
7.1	Weryfikacja   Powrót do pytań badawczych.....	130
7.2	Wnioski   Stopień realizacji zadań badawczych.....	133
7.3	Główne wyniki badań   Wkład badawczy.....	134
7.4	Ograniczenia i wyzwania.....	135
7.5	Rekomendacje.....	135
7.6	Dalsze możliwe kierunki badań.....	136
7.7	Uwaga końcowa.....	136
	BIBLIOGRAFIA.....	138
	SPIS TABEL.....	152
	SPIS RYSUNKÓW.....	153
	ZAŁĄCZNIKI.....	156



# STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

---

## **Adaptacja budynków do klimatu gorącego i skrajnie suchego.**

Propozycje systemów fasadowych inspirowanych naturą,  
projektowanych zgodnie z zasadami biomimikry.

Postępujące ocieplenie klimatu to fakt stwierdzony naukowo (1). Dyskusyjne pozostają jednak środki, jakie należy podejmować, żeby zapobiegać temu procesowi. W prezentowanej pracy doktorskiej skupiono się na wdrożeniu metody badawczej i projektowej, służącej rozwiązywaniu realnych problemów technicznych poprzez wzorowanie się na naturze. Biomimikra – metoda rozumnego naśladowania strategii, mechanizmów oraz procesów występujących w przyrodzie – jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną nauki. Umożliwia ona m.in. odkrywanie adaptacji organizmów, które ewoluowały w jednej strefie klimatycznej, i – po odpowiednim zaadaptowaniu – stosowanie zasad ich działania w innym klimacie. Takie podejście pozwala postrzegać zmiany klimatu, odczuwalną też w strefie klimatu umiarkowanego, w zupełnie innym, nowym kontekście.

Dysertacja prezentuje zastosowanie metody projektowej opartej na biomimikrze w dyscyplinie architektury. Projektowane rozwiązania fasad zaproponowano dla klimatu gorącego i skrajnie suchego, ale w uwagi na fakt, że warunki do życia na Ziemi będą coraz trudniejsze, być może wkrótce konieczne okaże się ich zastosowanie także w strefie klimatu umiarkowanego.

Przeprowadzone badania składają się z dwóch części: literaturowej i projektowej. W ramach studiów literaturowych wykonano analizę środowiska naturalnego i zbudowanego w klimacie gorącym i skrajnie suchym, a także zdefiniowano aktualne problemy i wyzwania jakie stoją przed architektami projektującymi w tej strefie klimatycznej.

W części projektowej pracy konsekwentnie zastosowano metodologię projektowania opartego na założeniach biomimikry, która składa się z czterech faz. W I fazie ustalono wyzwanie projektowe, opisano kontekst, w którym jest osadzone oraz wskazano poszukiwane funkcje, jakie mają pełnić mechanizmy adaptacyjne zaczerpnięte z przyrody, a w oparciu o tzw. „Zasady Życia” (*ang. Life Principles*) zdefiniowano aspiracyjne cele projektowe. II faza oparta była na szczegółowej analizie organizmów, które wykształciły mechanizmy adaptacyjne, umożliwiające im regulowanie temperatury lub chronienie się przed promieniowaniem słonecznym. W fazie tej opisano zasady działania tych strategii, a w oparciu o nie stworzono abstrakcyjne zasady projektowe. Faza III polegała na opracowaniu większej liczby koncepcji systemów fasad adaptowalnych inspirowanych naturą, z których część wybrano do szczegółowego rozważenia. W fazie IV trzy uszczegółowione rozwiązania poddano ewaluacji zgodnej z kryteriami wspomnianych wcześniej „Zasad Życia”, które w dużej mierze zbieżne są z zasadami zrównoważonego rozwoju. Metoda ta polega zatem na ciągłej analizie i weryfikacji informacji i wiedzy, aby ostatecznie stworzyć rozwiązanie spełniające warunki, które zostały sformułowane na wstępie.

Do najważniejszych osiągnięć uzyskanych w trakcie pracy zaliczyć można opracowanie autorskich klasyfikacji mechanizmów adaptacyjnych organizmów żywych, stworzenie 13 kart naturalnych wzorców projektowych oraz 3 oryginalnych rozwiązań uszczegółowionych poddanych ewaluacji.





# SUMMARY OF THE PHD DISSERTATION

---

## **Adaptation of buildings to hot-arid climates.**

Proposals for nature-inspired facade systems designed according to biomimicry principles.

The ongoing global warming is a scientifically accepted fact (1). However, the measures to be taken to prevent this change remain disputable. In the presented dissertation, the author focused on implementing a research and design method for solving real technical problems by mimicking nature. Biomimicry - a method of reasonable emulation of strategies, mechanisms and processes found in nature - is a rapidly developing field of science. Among other things, it makes it possible to discover the adaptations of organisms that have evolved in one climate zone and – after appropriate adaptation – apply their principles to another climate zone. This approach makes it possible to view climate change, which is also felt in temperate zones, in a completely different and new context.

The dissertation presents the application of a biomimicry-based design method to the discipline of architecture. The designed façade solutions were proposed for hot-arid climates, but in regard to the fact that conditions for life on Earth will become increasingly difficult, it may be soon necessary to apply them also in the temperate climate zone.

The research conducted consists of two parts: literature and design. As part of the bibliography query, the author performed an analysis of the natural and built environment in hot-arid climates, and defined the current problems and challenges faced by architects designing in this climate zone.

The study consistently applied the methodology of biomimicry design, which consists of four phases. In Phase I, the design challenge was established, the context in which it is embedded was described, and the functions sought to be performed by adaptive mechanisms drawn from nature were identified, and aspirational design goals were defined based on the so-called "Life Principles." Phase II was based on a detailed analysis of organisms that have evolved adaptive mechanisms that allow them to regulate temperature or protect themselves from solar radiation. In this phase, the principles of these strategies were described and, based on them, abstracted design principles were created. Phase III consisted of developing more concepts for nature-inspired adaptable façade systems, some of which were selected for detailed consideration. In Phase IV, the three detailed solutions were evaluated in accordance with the criteria of the "Life Principles" mentioned early on, which largely coincide with the principles of sustainable development. Thus, the method consists of continuous analysis and verification of information and knowledge in order to ultimately create a solution that meets the conditions that were formulated at the outset.

Among the most important achievements obtained in the course of the work are the development of the author's classifications of the adaptive mechanisms of living organisms, the creation of 13 cards of natural technologies and 3 original detailed solutions subjected to evaluation.



# PODZIĘKOWANIA

---

Prezentowana rozprawa doktorska jest wynikiem niemal pięciu lat badań, które tak naprawdę właściwą formę przybrały dwa i pół roku temu – w momencie rozpoczęcia studiów magisterskich z biomimikry na Uniwersytecie Stanowym w Arizonie (ASU) w Stanach Zjednoczonych. Podjęcie tych studiów było wynikiem pragnienia odnalezienia sposobu na projektowanie architektury naśladującej działanie ekosystemów i będących ich częścią organizmów żywych.

Praca ta nie powstałaby bez pomocy wielu osób, którym w tym miejscu chciałabym podziękować.

Szczególne podziękowania należą się mojemu promotorowi Marcinowi Brzezickiemu, który przez ostatnie lata dzielił się ze mną wiedzą, wierzył we mnie, wspierał wszystkie podejmowane działania oraz służył poradą do samego końca. Serdeczne podziękowania kieruję również do jego żony, Barbary Brzezickiej, która dokonała edycji językowej tekstu.

Podjęcie studiów z biomimikry, a tym samym pozyskanie wiedzy niezbędnej do przygotowania niniejszej pracy byłoby również niemożliwe, gdyby nie rekomendacje napisane przez Marcina Brzezickiego, Konrada Babulę, Jerzego Łątkę i Magdalenę Baborską-Narożny, za które im bardzo dziękuję. Osobom tym chciałabym także podziękować za cenne uwagi i dzielenie się wiedzą m.in. w trakcie wspólnego prowadzenia zajęć ze studentami lub uczestniczenie w prowadzonych przez nich kursach.

Podziękowania za dzielenie się wiedzą i pasją kieruję do Dayny Baumeister, współzałożycielki instytutu Biomimicry 3.8 i inicjatorki programu studiów magisterskich z biomimikry na ASU. Należą się one także prowadzącym i współuczestnikom podejmowanych przeze mnie do tej pory kursów. Wszystkim tym osobom chciałam podziękować za poświęcony czas, wyrozumiałość i wsparcie jakie od nich otrzymałam.

Szczególne podziękowania kieruję do mojej rodziny i bliskich, którzy stworzyli dla mnie „przestrzeń” do pracy. Dziękuję za ich wiarę i nieustanne wsparcie oraz pomoc w opiece nad dzieckiem.

Pracę tę dedykuję moim rodzicom, mężowi oraz rocznemu synkowi, którzy akceptowali moje wybory i brak czasu. Dziękuję im za każdy dzień spędzony razem, uśmiech, miłość i motywację do ukończenia pracy.

Niemniej wdzięczna jestem Bogu za to jaką mnie stworzył.



## OBJAŚNIENIE POJĘĆ

---

W poniższej sekcji objaśniono pojęcia, bezpośrednio lub pośrednio powiązane z nurtem projektowania naśladowującego naturę. Definicje te sporządzone zostały w oparciu o rozumienie ich przez autorkę, podparte wiedzą i doświadczeniem zdobytym w czasie studiów magisterskich z zakresu biomimikry. Decyzja o dołączeniu objaśnień do pracy motywowana była faktem, iż pojęcia te są wciąż słabo rozpowszechnione, a ponadto często błędnie wykorzystywane (2). Według autorki, mylne stosowanie pojęć może prowadzić do nadinterpretacji, a tym samym niewłaściwego posługiwania się daną metodologią, skutkującego brakiem osiągania pożądanych rezultatów.

**Biofilia** (*ang. biophilia*) – termin spopularyzowany przez E.O. Wilsona (3), odnoszący się do hipotetycznego założenia istnienia wrodzonej cechy, jaką jest odczuwanie bliskości z naturą. Według teorii filozofii jest to naturalna potrzeba kontaktu z przyrodą, mająca zbawienny wpływ na ludzkie zdrowie i poczucie psychiczne. W nurcie tym wyróżniany jest również kierunek projektowy (*ang. biophilic design*), którego założeniem jest tworzenie przestrzeni i form, dających człowiekowi poczucie przebywania w bliskości z naturą.

**Biomimetyka** (*ang. biomimetics*) – termin rozpowszechniony w latach 50. XX wieku przez Otto Schmitta (4), (5), często używany jako synonim dla biomimikry. Jednak w przeciwieństwie do niej pozbawiony elementu etosu. Z tego względu w założeniu dopuszcza się tworzenie w oparciu o biomimetykę rozwiązań z różnych dziedzin, również z zakresu technologii militarnych, które często mają niewiele wspólnego z adoracją życia.

**Biomimikra** (*ang. biomimicry*) – jedna z metod projektowania inspirowanego naturą (6), (7), (8). Termin używany od 1962 roku, spopularyzowany przez Janine Benyus w 1997 roku, po publikacji jej książki (9). Istotnym czynnikiem odróżniającym biomimikrę od innych podejść jest skupienie uwagi na uczeniu się od natury oraz naśladowaniu występujących w przyrodzie mechanizmów, strategii i procesów w celu tworzenia rozwiązań mogących sprostać określonym wyzwaniom funkcjonalnym. Podejście to charakteryzuje również działanie mające na celu tworzenie warunków dogodnych dla życia i oparcie na jednym z trzech filarów jaki stanowi etos. Celem tworzonych rozwiązań jest naprawa środowiska i przeciwdziałanie szkodom wyrządzonym dotychczas przez ludzi.

**Biomorfizm** (*ang. bio-morphism*) – podejście projektowe określane także mianem *architektury organicznej* (10). W przeciwieństwie do myślenia opartego na biomimikrze, biomorfizm skupia się na imitowaniu form lub elementów spotykanych w naturze, odnosząc się tym samym głównie do aspektu czysto estetycznego, całkowicie pomijając kwestie funkcjonalne, bądź sposób w jaki dane rozwiązanie oddziałuje na środowisko (11).

**Bionika** (*ang. bionics*) – twórcą pojęcia w latach 60. XX wieku był major Jack Steele (4), (10). Dziedzina z założenia jest nastawiona na tworzenie innowacji technologicznych, np. w medycynie, w ramach której tworzone są implanty bioniczne zastępujące lub ulepszające dane części ciała. W ogólnym ujęciu bionikę w porównaniu do biomimikry w pierwotnym założeniu cechuje nieco inne podejście do badań, dążące do zwiększenia przewidywalności i kontroli (12).

**Bio-utylicacja** (*ang. bio-utilization*) – pojęcie niekiedy mylone z biomimikrą (2). Termin ten odnosi się do bezpośredniego pozyskiwania materiałów naturalnych, bądź żywych organizmów dla celów użytkowych (13). Przykładem bio-utylicacji może być wycinanie drzew na potrzeby wznoszenia konstrukcji drewnianych lub zrywanie dziko rosnących roślin leczniczych.

**Projektowanie inspirowane naturą** (*ang. bio-inspired design*) – ogólny termin, określający czerpanie inspiracji z organizmów żywych do tworzenia rozwiązań technicznych. Założeniem tej metody jest tworzenie rozwiązań, których potencjał rozwoju, w odróżnieniu od biomimikry, wykracza poza strategie, czy mechanizmy istniejące w przyrodzie. Ponadto w podejściu tym cała uwaga jest w znacznej mierze skupiona na samym projektowaniu (14).

**Technologie wspomagane biologicznie** (*ang. bio-assisted technologies*) – termin odnosi się do rozwiązań opartych na wykorzystaniu istniejących w naturze elementów do spełniania funkcji biologicznej, np. udomowianie organizmów – hodowanie krów do produkcji mleka lub, jak w przypadku australijskiej firmy Biolytixwater, wykorzystanie organizmów żywych i materiałów, tworzących ściółkę leśną, w procesach filtrowania i oczyszczania wody (2).

## WSTĘP

---

Postępujące ocieplenie klimatu to fakt stwierdzony naukowo (1). Dyskusyjne jednak pozostają środki, jakie należy podejmować, żeby zapobiegać temu procesowi. Obecnie istotną część dyskursu na temat zapobiegania negatywnym konsekwencjom ocieplenia klimatu skupia się wokół paradygmatu zrównoważonego rozwoju (15), (16), (17), (18), (19), (20), (21), (22), (23), (24), (25), który zakłada, że obecnie żyjący powinni pozostawić świat przyszłym pokoleniom w stanie nie gorszym od tego, który zastali na początku swojego życia. Według rozpowszechnionego wśród kultur zachodnich przekonania, źródłem do osiągnięcia tego celu jest stosowanie „ekologicznych” i „energooszczędnych” technologii, czasem zupełnie bezrefleksyjne, nie uwzględniające ich faktycznego oddziaływania na środowisko, np. pełnego cyklu życiowego (*ang. Life Cycle Assessment*) (12), (26). Praktyka, zdrowy rozsądek, ale także recenzowane publikacje naukowe (26), (27), (28), (29) pokazują, że zdarza się, że rozwiązania „ekologiczne” i „energooszczędne” z nazwy często wcale takie nie są, a określenia te zdewaluowały się i są używane jedynie w celach marketingowych jako hasła reklamowe.

Wobec obfitości informacji o bardzo różnej jakości (od reklamowych przekazów bez żadnej wartości po recenzowane publikacje naukowe) uwagę przyciąga metoda badawcza, będąca prawdziwie „ekologiczną” – w sensie pierwotnego, encyklopedycznego znaczenia tego słowa, czyli „badania oddziaływań między organizmami a środowiskiem” (26), (27). Tą metodą jest biomimikra, służąca rozwiązywaniu realnych problemów technicznych poprzez wzorowanie się na naturze. W prezentowanej pracy doktorskiej skupiono się na wdrożeniu jej do projektowania architektonicznego w celu zmierzenia się z wyzwaniem przegrzewania budynków. Biomimikra – metoda rozumnego naśladowania strategii, mechanizmów oraz procesów występujących w przyrodzie – jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną nauki, umożliwiającą m.in. odkrywanie adaptacji organizmów, które ewoluowały w jednej strefie klimatycznej, i – po odpowiednim zaadaptowaniu – stosowanie zasad ich działania w innym klimacie.

Strategie, mechanizmy i procesy występujące w przyrodzie są efektem ponad 3,8 miliarda lat ewolucji (9). W wyniku zachodzących sukcesywnych procesów ewolucyjnych organizmy przez lata zdołały wykształcić liczne adaptacje morfologiczne, behawioralne i funkcjonalne, które umożliwiły im przystosowanie się do nieustannie zmieniających się warunków klimatycznych, nie przyczyniając się do degradacji środowiska oraz zanieczyszczenia planety.

Pomimo iż termin biomimikra znajduje się w użyciu dopiero od lat 60. XX wieku to wielu architektów oraz wynalazców już wcześniej czerpało inspirację z natury, nie tylko poprzez samo imitowanie form, ale również poprzez analizę funkcjonowania mechanizmów spotykanych w świecie przyrody (30), (31). Obecna zmiana sposobu postrzegania otaczającego nas świata stanowi przełomowy moment, w którym naturę traktujemy nie tylko jako źródło wzorców (modeli) i standardów (miary), ale również metaforycznie – jako „nauczyciela” (mentora), do którego zwracamy się z pytaniem, w jaki sposób rozwiązać dany problem (9), (12), (32), (33), (34). Przyroda z pełnym wachlarzem wykształconych przez miliardy lat rozwiązań stanowi niezastąpione źródło wiedzy, które wymaga jednak świadomej analizy i badań. Właściwe przekazanie tej wiedzy specjalistom w innych dziedzinach, również architektom, stanowi istotne wyzwanie. Jego realizacja pozwoli przekształcić tę wiedzę w owocne rozwiązania bez konieczności poszerzania ich kompetencji o specjalizację w dziedzinie biologii lub chemii.

Na Ziemi występują środowiska, które charakteryzują się warunkami niesprzyjającymi życiu, np. ekstremalnie gorące albo zimne, bez tlenu, czy wody (35). Zamieszkują je jednak formy życia, które w wyniku naturalnej selekcji dostosowały się do funkcjonowania i rozmnażania się w tych środowiskach. Organizmy te bez wątplenia mogą stanowić niezastąpione źródło wiedzy dla naukowców, którzy dzięki umiejętnemu ich naśladowaniu będą w stanie tworzyć innowacyjne rozwiązania i technologie. W architekturze myślenie oparte na biomimikrze stwarza potencjał kreowania rozwiązań pozwalających na projektowanie budynków, które będą mogły być nieustannie przystosowywane do zmieniających się warunków.

Dotychczas podobne zadanie pełniła oparta na tradycyjnych technologiach i rozwiązaniach architektura wernakularna<sup>1</sup> (36), dostosowana do lokalnego kontekstu i korzystająca z dostępnego w danym miejscu zasobu materiałów (17), (37), (38). Odmierna w zależności od regionu architektura była wynikiem wielu lat prób i błędów, które – podobnie jak ewolucja – kształtowały jej formę i różnorodność (39). Tworzone w ten sposób wzorce stanowiły rozwiązania modelowe, które w konkretnych regionach pozwalały ludziom zapewnić dogodne do życia warunki przy jednoczesnym zapewnieniu wydajności energetycznej, jak też przydatności, trwałości i bezopadowości (36), (40). Jednak nie tylko postęp cywilizacyjny zachodzący w ostatnim czasie<sup>2</sup>, ale także dynamiczne zmiany klimatu sprawiają, iż dawne, tradycyjne, długo wykształcane modele, przestają spełniać wymagania współczesnych użytkowników.

Zmiany zachodzące we współczesnym stylu życia ludzi, w tym ilość spędzanego wewnątrz budynków czasu, generują potrzebę adaptacji obiektów budowlanych do nowych wymogów, gdzie znaczenia nabiera nie tylko zapewnienie optymalnych warunków i jakości powietrza wewnątrz tych obiektów, ale również naprawa oraz przeciwdziałanie szkodom dotychczas wyrządzonym środowisku naturalnemu.

Przedmiotem tej dysertacji jest prezentacja procesu projektowego opartego na założeniach biomimikry w relacji do dyscypliny architektury. Niniejsza praca skupia się na analizie jednego wybranego środowiska ekstremalnego. Z racji mnogości klimatów występujących na Ziemi ograniczono się do prowadzenia badań w odniesieniu do budynków zlokalizowanych w regionach w klimacie określonym jako „gorący i skrajnie suchy”. Wybór ten związany jest z aktualnie zachodzącymi na świecie zmianami, wskazującymi na to, że temperatura w wielu regionach na Ziemi będzie wzrastać, tworząc coraz trudniejsze warunki do życia (1), (17), (41). Faktem jest, że

---

<sup>1</sup> Architektura wernakularna – określana również mianem „architektury bez architekta” odnosi się do budownictwa regionalnego, które tworzone było przez użytkowników budynków, rzemieślników i majstrów w oparciu o wiedzę przekazywaną z pokolenia na pokolenie (36).

<sup>2</sup> Przykładem niedostosowania dawnych modeli do współczesnych warunków są miasta. Znaczący wpływ na kształtowanie obecnej tkanki urbanistycznej ma wprowadzanie do miast transportu kołowego. Tworzenie szerokich utwardzonych arterii ulicznych, brak zróżnicowanej zieleni, zbiorników wodnych, czy jakichkolwiek elementów zacieniających istotnie przyczyniają się do zmiany lokalnego mikroklimatu (125). Ponadto badania przeprowadzone w 2001 roku przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska wskazują, że współcześnie przeciętny Amerykanin spędza średnio 87% swojego czasu wewnątrz budynków (282), co stanowi istotną zmianę w stylu życia w porównaniu do naszych przodków. By poprawić klimat wewnętrzny, rozwiązaniem, na które często decydują się ludzie, jest montaż systemów HVAC. Jak w przypadku większości urządzeń mechanicznych do ich zasilania potrzebna jest jednak znaczna ilość energii. Poza tym poprzez częste niewłaściwe użytkowanie, instalacje te powodują jedynie pogorszenie warunków bytowych ludzi, spadek odczuwalnego komfortu i wzrost temperatury otoczenia w wyniku uwalniania ciepłego powietrza wywiewanego z budynku. Te i inne przykłady wskazują, jak bardzo środowisko zbudowane przez ludzi, często oparte na nieprzemyślanych, krótkoterminowych i liniowych rozwiązaniach, wywiera presję na otoczenie, przyczyniając się do jego destrukcji.



obecnie większość obszaru Ziemi objęta jest klimatem suchym (30,2%) (42), wśród którego odmianą jest typ BWh (gorący, suchy 14,2%) (43). W ramach studiów wykonano analizę środowiska naturalnego i zbudowanego, a także zdefiniowano aktualne problemy i wyzwania, jakie stoją przed architektami projektującymi w tych regionach. W efekcie, w oparciu o strategie i mechanizmy zaczerpnięte z natury opracowano koncepcje rozwiązań pozwalających na poprawę komfortu termicznego wewnątrz budynków w strefie gorącej, suchej, z których następnie wybrano i rozwijano trzy. W ostatniej fazie trzy uszczegółowione rozwiązania zostały poddane ewaluacji.



# 1

## Wprowadzenie

# 1 WPROWADZENIE

---

## 1.1 MOTYWACJA | UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU

Na całym świecie dążenie do zapewnienia optymalnego komfortu termicznego przyczyniło się do znacznego wzrostu zapotrzebowania na energię. W związku z tym rośnie waga efektywności energetycznej, która w procesie projektowym jest definiowana przez charakterystykę energetyczną budynku (16). Współcześni badacze podkreślają, że architekci średniowiecznych zamków, barokowych pałaców, czy wieżowców przełomu XX i XXI wieku, nie przykładali zbyt wielkiej uwagi do relacji pomiędzy zapotrzebowaniem energetycznym niezbędnym do stworzenia optymalnych warunków dla użytkowników, a formą tych obiektów (26), (44), (45). W swojej pracy Lidia Badarnah-Kadri (30) wskazuje, że większość budynków ubiegłego stulecia została określona mianem architektury międzynarodowej właśnie z powodu stosowania identycznych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych, bez uwzględniania kontekstu i klimatu, które przecież różnią się w zależności od regionu.

Jak podają autorzy różnych publikacji (15), (16), (17), (26), (30) przełomem w historii projektowania zrównoważonego był kryzys naftowy w latach 70. XX wieku. Projektując budynki zgodne z założeniami architektury zrównoważonej, twórcy musieli zwrócić szczególną uwagę na następujące zagadnienia (18), (23):

- (i) Racjonalne wykorzystanie terenu (integrację ze środowiskiem);
- (ii) szacunek dla użytkownika (dbanie o jakość i komfort);
- (iii) myślenie o redukcji, ponownym użyciu oraz recyklingu (*ang. reduce, reuse, recycle*) – terenu, kubatury i materiałów (zapewnianie efektywności gospodarki: wodno-ściekowej, materiałami i surowcami);
- (iv) dbanie o energooszczędność (myślenie o efektywności energetycznej);
- (v) wykorzystanie alternatywnych źródeł energii – (używanie lokalnych i innowacyjnych rozwiązań).

Wszystkie te założenia są zgodne z najbardziej popularną definicją zrównoważonego rozwoju (46) cytowaną przez Mead i Jeanrenaud (27), według której rozwój ten *zaspokaja potrzeby obecnego pokolenia bez umniejszania szans przyszłych pokoleń na zaspokojenie ich własnych potrzeb*. Wzrastająca świadomość ekologiczna społeczeństwa spowodowała stopniową, wciąż postępującą zmianę sposobu myślenia oraz skierowanie uwagi zarówno w stronę racjonalnego zarządzania zasobami naturalnymi i energią, jak też gospodarowania odpadami. Jednak, nawet pomimo tych zmian, ludzie – tak jak dowodzi wyżej cytowana definicja zrównoważonego rozwoju – wciąż stawiają w centrum przede wszystkim własne dobro.

Powołując się na słowa Lechnera (47) Badarnah-Kadri podkreśla, że sposobem na realizację cytowanych zasad architektury zrównoważonej może być czerpanie z tego, co najlepsze w „starym i nowym”. Mówiąc o „starym” ma na myśli wykorzystanie architektury tradycyjnej, która uwzględniała ludzkie potrzeby oraz lokalne uwarunkowania. „Nowym” zaś określa współczesną naukę i technologię. Podobne podejście prezentuje w swojej książce Foruzanmehr, który twierdzi, że takie zintegrowane projektowanie jest właściwym sposobem, by tworzyć rozwiązania ekologiczne i dostosowane lokalnie (17).

Obecnie dostrzec można rosnące zainteresowanie naukowców oraz projektantów programami komputerowymi pozwalającymi na wykonywanie różnego rodzaju symulacji i analiz (patrz: Rozdz. 1.9). W przypadku projektantów umożliwia to wykrywanie na wczesnym etapie błędów i kolizji. Tym samym ogranicza się koszty i dobiera rozwiązania pozwalające na optymalizowanie zużycia energii w budynkach, przy jednoczesnym budowaniu komfortu termicznego (15), (48). Wśród profesjonalistów szczególną popularność zdobyły oprogramowania pozwalające na tworzenie Modeli Informacyjnych Obiektu Budowlanego, czyli wykorzystanie tzw. metodologii Building Information Modeling (BIM), do których należą Revit i ArchiCAD (49). Poza domyślnie wbudowaną funkcjonalnością tych programów, pozwalającą na modelowanie energetyczne w uproszczonym stopniu, istnieje także możliwość zasilenia danymi z modeli BIM aplikacji zewnętrznych przeznaczonych do bardziej szczegółowych symulacji energetycznych. Należą do nich m.in. DesignBuilder, Ecotect, EnergyPlus, Green Building Studio, IDA ICE czy IES VE (49).

W wielu pracach badacze podkreślają, że budynki i technologie tworzone przez ludzi powinny stanowić integralną część środowiska naturalnego (26), (30), (34), (50). Człowiek powinien tworzyć wzajemne powiązania i interakcje ze środowiskiem, a zatem nie tylko brać, ale przede wszystkim dawać. W tym wypadku korzyści płynące z projektowania opartego na strategiach adaptacyjnych rozumianych w kontekście środowiskowym wydają się być punktem kluczowym do tworzenia nowego rodzaju architektury: reagującej na zmiany środowiskowe (15), (30), (51). Stąd największe wyzwanie stanowi wymiana i prezentacja informacji z zakresu różnych dziedzin naukowych, jak i jej późniejsze właściwe wykorzystanie (52). Wydaje się, że dzięki połączeniu współczesnych technologii oraz myślenia opartego na *biomimikrze* jest to jak najbardziej możliwe.

## 1.2 BIOMIMIKRA | INNOWACYJNA DZIEDZINA WIEDZY

Biomimikra to stosunkowo młoda dziedzina nauki, której początki sięgają lat 60. XX wieku. Nazwa wywodzi się z kombinacji greckich słów *bios* (życie) i *mimesis* (naśladowanie). Zgodnie z definicją Benyusa (9) biomimikra polega na badaniu najbardziej udanych osiągnięć natury, a następnie świadomym – intencjonalnym – naśladowaniu tych projektów i procesów w celu rozwiązywania problemów cywilizacyjnych ludzkości. Termin „natura” określa ogół organizmów żywych, zjawisk i procesów zachodzących w przyrodzie, które dążąc do osiągnięcia stanu równowagi podlegają wzajemnym interakcjom. Postrzegana w ten sposób przyroda stanowi niezastąpione źródło wiedzy oparte na ponad 3,8 miliardach lat „naturalnych badań i wysiłków projektowych”, które nazywamy ewolucją (53). Dzięki biomimikrze możliwe jest tworzenie i rozwijanie nowych produktów, procesów, czy systemów, jak również ulepszanie już istniejących.

## 1.3 PROBLEM BADAWCZY | WYZWANIE

Rosnące wymogi i regulacje sprawiają, że obecne budynki muszą spełniać coraz wyższe normy zarówno pod względem samej efektywności energetycznej, jak też ogólnego tzw. cyklu życiowego materiałów (*ang. Life-cycle assessment, LCA*), które się na nie składają. Powszechnie dostrzegana jest nagląca potrzeba poprawy sposobu projektowania, lub wręcz zmiany podejścia do rozwiązywania zagadnień energooszczędności (54). Pod tym względem widoczne jest rosnące zainteresowanie projektowaniem zrównoważonym (15), (51), jak również rozwiązywaniem problemów projektowych zgodnym z zasadami biomimikry, czyli inspiracji opartych na „mądrości

zaczepniętej z natury”<sup>3</sup> (34), (53), (54). W ostatnich latach w oparciu o te zasady stworzono wiele udanych rozwiązań materiałowych lub technologicznych (30), (31), (45), (50), (55), z których część z powodzeniem znalazła zastosowanie w życiu codziennym. Pojęcie oraz założenia biomimikry są jednak wciąż słabo rozpropagowane, także w środowisku architektonicznym.

W pracy zaprezentowano metodologię i główne zasady projektowania opartego na biomimikrze. Środkiem do realizacji tego celu jest klarowne przekazywanie informacji z zakresu nauk przyrodniczych. Skupiono się na prowadzeniu badań nad rozwiązaniami fasadowymi, które mogłyby wpłynąć na poprawę komfortu termicznego wewnątrz budynków projektowanych w środowisku gorącym i skrajnie suchym (patrz: Rozdz. 5, Rozdz. 6).

Wyraźna zmiana stylu życia spowodowana pandemią przyczyniła się do tego, że duża część społeczeństwa zaczęła spędzać coraz więcej czasu w pomieszczeniach zamkniętych. Z tego powodu podjęto decyzję o badaniu komfortu termicznego, opisującego stopień zadowolenia z odczuwalnej temperatury otoczenia (56). Jak podkreślają badacze (54) zapewnienie komfortu cieplnego, będącego jednym z czynników istotnie wpływających na tworzenie optymalnych warunków do życia, jest jednym z głównych wyzwań projektowych w regionach gorących i skrajnie suchych. Część badawcza pracy polegać będzie na: (i) przeprowadzeniu analiz mechanizmów adaptacyjnych organizmów żywych, (ii) zrozumieniu zasady ich działania (bądź prześledzeniu strategii behawioralnych), (iii) opracowaniu rozwiązań fasad opartych na przeanalizowanych mechanizmach. Ostatecznie rozwiązania te zostaną poddane ocenie, która wskaże, w jakim stopniu udało się osiągnąć założony cel.

## 1.4 CEL | ZADANIA BADAWCZE

Główny cel niniejszej publikacji stanowi:

***Stworzenie rozwiązań architektonicznych zaprojektowanych zgodnie z zasadami biomimikry, które mają potencjał do poprawy komfortu termicznego wewnątrz budynków w strefie gorącej, skrajnie suchej.***

W tym celu niezbędna będzie realizacja kolejnych zadań:

**Zadanie 1.:** *Prezentacja podstawowych założeń biomimikry w projektowaniu architektonicznym oraz analiza możliwości ich zastosowania.*

**Zadanie 2.:** *Dokonanie przeglądu oraz syntezy podstawowych cech założeń urbanistycznych oraz rozwiązań architektonicznych stosowanych w budynkach zlokalizowanych w regionach gorących, skrajnie suchych.*

**Zadanie 3.:** *Ustalenie głównych problemów i wyzwań jakie stoją przed architektami projektującymi obiekty w strefie gorącej, skrajnie suchej.*

**Zadanie 4.:** *Zbadanie potencjału stosowania metodologii badań opartej na zasadach biomimikry w architekturze, w klimacie gorącym, skrajnie suchym.*

---

<sup>3</sup> W filozofii biomimikry natura, która przez miliony lat wykształciła wiele oryginalnych i rewolucyjnych strategii i mechanizmów adaptacyjnych, pozwalających na trwały i sukcesywny rozwój organizmów żywych funkcjonujących w zgodzie z ekosystemem ziemskim, określana jest jako „geniusz życia” (ang. „Life’s genius”) (32).

## 1.5 TEZA | PYTANIA BADAWCZE

***Biomimikra pozwala na tworzenie zrównoważonych rozwiązań pozwalających na optymalizowanie komfortu termicznego. Metoda ta możliwa jest do wdrożenia w procesie projektowania architektonicznego.***

Na podstawie postawionej tezy zadano następujące główne pytanie badawcze:

***W jaki sposób tworzyć rozwiązania możliwe do zastosowania w architekturze pozwalające na regulowanie komfortu termicznego wewnątrz budynku, oparte na strategiach adaptacyjnych zaczerpniętych z natury?***

W celu znalezienia odpowiedzi na powyższe pytanie kolejne rozdziały poruszają następujące istotne kwestie:

**Pytanie 1.:** *Jakie czynniki przyczyniają się do zaburzania optymalnego komfortu termicznego w klimacie gorącym i skrajnie suchym?*

**Pytanie 2.:** *Które rozwiązania stosowane w architekturze tradycyjnej pozwoliły na dostosowanie budynków do funkcjonowania w badanym klimacie? Czy możliwa jest ich adaptacja do obecnych wymogów współczesnego społeczeństwa?*

**Pytanie 3.:** *Jakie są główne wyzwania projektowe związane z kształtowaniem komfortu termicznego wewnątrz budynków, którym muszą sprostać architekci projektujący w regionach gorących, skrajnie suchych?*

**Pytanie 4.:** *Które mechanizmy, struktury czy procesy występujące w przyrodzie są odpowiednie do tworzenia rozwiązań pozwalających na poprawę komfortu termicznego wewnątrz budynków w badanej strefie?*

**Pytanie 5.:** *Jak w zrozumiały sposób przekazać architektom zasady działania mechanizmów, strategii, struktur czy procesów występujących w naturze, aby mogli je później zastosować do tworzenia zrównoważonych rozwiązań w architekturze?*

**Pytanie 6.:** *W jaki sposób oceniać rozwiązania inspirowane naturą?*

## 1.6 METODOLOGIA BADAŃ | PODEJŚCIE

W prezentowanej pracy zastosowano szereg metod badawczych. Początkowe badania oparto na studiach literaturowych (*ang. desk study*). W ramach kwerendy bibliograficznej przeprowadzono analizę uwarunkowań strefy gorącej, skrajnie suchej, a także – metodą analizy danych – ustalono, jakie są zasady projektowania miast i budynków w opisywanej strefie klimatycznej. W przeprowadzaniu tych analiz kluczową rolę odegrały badania wykonane metodą obserwacyjną (bez ingerencji obserwatora) prowadzone w czasie wyjazdów studialnych do Egiptu oraz podróży, które autorka odbyła w ramach uzyskanych stypendiów oraz sfinansowała z własnych środków<sup>4</sup>. Rezultaty tych obserwacji zostały utrwalone metodą fotograficzną i za pomocą ręcznych szkiców. Na etapie przygotowawczym przeprowadzono również wywiady (metoda badawcza: wywiad) ze

---

<sup>4</sup> Wyjazdy do Egiptu (Kair, Luksor, Aleksandria) w ramach stypendium przyznanego przez Uniwersytet Warszawski i Polskie Centrum Archeologii Śródziemnomorskiej (PCMA) w okresach luty - marzec 2017 oraz kwiecień - maj 2017. Wyjazd do Iranu (Teheran, Isfahan, Sziraz) finansowany ze środków własnych w marcu 2017.

specjalistami z różnych dziedzin: klimatologii, mechaniki i energetyki, biomimikry, czy architektury bioklimatycznej. Z wywiadów tych powstały ręczne notatki oraz nagrania dźwiękowe.

W zasadniczej części pracy, w czasie weryfikowania założonej tezy, badania przeprowadzono zgodnie z metodologią projektowaną opartego na zasadach biomimikry. W trakcie studiów literaturowych zidentyfikowano 63 przykłady mechanizmów adaptacyjnych ze świata flory i fauny, spośród których 13 poddano dokładnej analizie. W efekcie opracowano 13 kart, podsumowujących strategie przystosowawcze badanych organizmów. W oparciu o stworzoną taksonomię przeprowadzono „burzę mózgów” (*ang. brainstorming*), w wyniku której powstało osiem propozycji koncepcji inspirowanych naturą, mających potencjał na poprawę komfortu termicznego wewnątrz budynków w środowisku gorącym i skrajnie suchym. Trzy z nich poddano dokładnemu opracowaniu i ewaluacji w oparciu o tzw. „Zasady Życia”.

Wyniki przeprowadzonych badań stworzyły podstawę do sformułowania wniosków. W tej części autorka posłużyła się metodą badawczą analiz, wnioskowania a – w końcowym etapie – zbiorczej syntezy i skrótego określenia osiągniętych rezultatów.

Właściwe ukierunkowanie i niezastąpiony wkład w pracę ma podjęcie przez autorkę studiów magisterskich z biomimikry realizowanych na Uniwersytecie Stanowym w Arizonie, które pozwalają na teoretyczne i praktyczne poznanie wykorzystywanej w tej pracy metodologii (patrz: Rozdz. 2). Wspomniana metodologia tworzy tym samym układ pracy, składającej się z czterech kolejnych faz: **I – ustalania zakresu**, **II – odkrywania**, **III – tworzenia** i **IV – ewaluacji** (oceniań).

## 1.7 METODYKA | KOLEJNOŚĆ DZIAŁAŃ I SCHEMAT BADAŃ

**FAZA I – USTALANIE ZAKRESU** (*ang. Scoping*): W części badawczej pracy autorka postanowiła skupić się na wyzwaniu projektowym, które zostało wybrane w oparciu o wnioski wyciągnięte w części analitycznej pracy. Na podstawie sformułowanego wyzwania określone zostały poszukiwane u organizmów żywych funkcje: pierwotna i uzupełniająca. Następnie wskazano ograniczenia projektowe, którym sprostać powinno tworzone rozwiązanie. Ostatecznie określono aspiracyjne cele projektowe, które zostały opisane w odniesieniu do „Zasad Życia” (patrz: Rozdz. 2.2.1), traktowanych w *fazie I* jako wzorce projektowe zaczerpnięte z natury.

**FAZA II – ODKRYWANIE** (*ang. Discovering*): Autorka przeprowadziła analizę strategii i zasad działania mechanizmów pochodzących z natury w oparciu o studia literaturowe, wywiady z ekspertami oraz bazę danych zamieszczoną na portalu AskNature<sup>5</sup>. Na podstawie wybranych źródeł autorka zidentyfikowała 63 organizmy, które wykształciły mechanizmy adaptacyjne, będące źródłem inspiracji do tworzenia rozwiązań, będących odpowiedzią na zidentyfikowane w pracy wyzwanie projektowe. Trzy spośród nich autorka poddała dokładnej analizie. W oparciu

---

<sup>5</sup> AskNature jest nieustannie aktualizowaną platformą internetową stworzoną przez Instytut Biomimikry 3.8. Obecnie stanowi ona jedno z narzędzi pracy wykorzystywanych przez adeptów biomimikry. Platforma stanowi niezastąpione źródło wiedzy z zakresu nauk przyrodniczych prezentowanej w sposób przystępny dla specjalistów różnych dziedzin. Korzystanie z niej opiera się na poszukiwaniu informacji na temat rozwiązań wykształconych przez naturę do opracowywania innowacyjnych rozwiązań. Dostępna na portalu wyszukiwarka umożliwia przeglądanie bazy danych, która podzielona została na cztery kategorie: (i) strategie biologiczne – rozwiązania występujące w naturze, (ii) innowacje – istniejące rozwiązania, bądź projekty badawcze, (iii) zasoby – obejmujące materiały dydaktyczne i opracowania naukowe, (iv) zbiory – grupy rozwiązań podzielonych według określonych kategorii.



o pochodzące z natury strategie autorka opracowała abstrakcyjne zasady projektowania, a następnie sporządziła klasyfikację tych organizmów.

**FAZA III – TWORZENIE** (*ang. Creating*): Określone w *fazie II* „abstrakcyjne zasady projektowania” posłużyły do opracowania ośmiu koncepcyjnych rozwiązań, wpływających na poprawę komfortu termicznego wewnątrz budynków w strefie gorącej, skrajnie suchej. Spośród nich do dalszych badań wybrano trzy z największym potencjałem do wdrożenia.

**FAZA IV – OCENIANIE** (*ang. Evaluating*): Autorka poddała wybrane rozwiązanie ewaluacji w oparciu o tzw. „Zasady Życia” (*ang. Life Principles*). Rozwiązania następnie zostały ze sobą porównane. W wyniku oceny zostały wykazane kluczowe punkty, w oparciu o które rozwiązania projektowe mogą być w dalszym ciągu optymalizowane.

Kolejność prowadzonych badań przedstawiono na rysunku 1-1.



Rys. 1-1 Schemat prezentujący kolejność prowadzonych badań. Opracowanie własne.

## 1.8 STRUKTURA PRACY | STRESZCZENIE I SCHEMAT UKŁADU PRACY

Praca doktorska opisuje i systematyzuje szeroki kontekst uwarunkowań, które są istotne dla procesu projektowego na przykładzie budynków zlokalizowanych w badanej strefie gorącej, skrajnie suchej. Przyjęta metoda pracy bazująca na myśleniu opartym na zasadach biomimikry tworzy strukturę pracy, prowadząc przez kolejne rozdziały, będące odpowiedzią na postawione pytania badawcze. Schemat jej układu przedstawiono na rysunku 1-2.

### ROZDZIAŁ 1

Rozdział pierwszy przedstawia schematyczny układ pracy. Przedstawiono w nim motywację podjęcia badań oraz cel pracy badawczej. Zaprezentowano również tezę oraz metodologię prowadzenia badań. W zwięzły sposób podsumowano aktualny stan badań na podstawie literatury krajowej i zagranicznej.

### ROZDZIAŁ 2

W rozdziale drugim omówiono filozofię i fundamenty biomimikry. Wprowadzono podstawowe założenia, narzędzia oraz strategie projektowe, stanowiące integralną część metodologii pracy. Wybrano i opisano również metodę prowadzenia dalszych badań.

### ROZDZIAŁ 3

W rozdziale trzecim wprowadzono pojęcie natury oraz sposób jej postrzegania przez praktyków biomimikry. Ukazano relację pomiędzy biometem a klimatem, a także dokonano charakterystyki środowiska gorącego i skrajnie suchego objętego opracowaniem. W ramach przeglądu przedstawiono główne czynniki, które wpływają na zaburzone odczuwanie komfortu termicznego przez człowieka. Poza tym zaprezentowano również wzorcowe mechanizmy adaptacyjne ze świata flory i fauny, które umożliwiły poszczególnym organizmom przystosowanie się do życia w trudnych warunkach pustynnych. W zamierzeniu rozdział ten tworzy tło niezbędne do zrozumienia kontekstu prowadzonych badań.

### ROZDZIAŁ 4

W rozdziale czwartym wyjaśniono pojęcie komfortu, ze szczególnym zwróceniem uwagi na komfort termiczny oraz opisano czynniki wpływające na jego kształtowanie. Dokonano także przeglądu rozwiązań urbanistycznych i architektonicznych – lokalnych metod, technologii oraz materiałów, które od dawna pozwalały na tworzenie dogodnych do życia warunków wewnątrz budynków w rejonach pustynnych. Poza zaleceniami projektowymi wynikającymi z przeglądu literatury, rozdział ten definiuje główne wyzwanie projektów: prezentuje szeroki kontekst, w którym osadzone są dalsze badania oraz wskazuje wyzwania, stojące przed projektantami.

### ROZDZIAŁ 5

Rozdział piąty składa się z dwóch części, będących kolejnymi krokami wybranej w rozdziale drugim metody prowadzenia badań. W pierwszej części – *faza I: Określanie zakresu* – zwięźle przedstawiono tło oraz kontekst towarzyszące wybranemu wyzwaniu projektowemu. Wskazano także funkcję, jaką ma pełnić tworzone rozwiązanie oraz ograniczenia, które należy uwzględnić w trakcie procesu projektowego. Wymieniono również aspiracyjne cele projektowe. Druga część

rozdziału – *faza II: Odkrywanie* – prezentuje listę naturalnych strategii i mechanizmów, spośród których trzynaście najbardziej obiecujących zostało poddanych szczegółowej analizie.

## **ROZDZIAŁ 6**

Rozdział szósty rozpoczyna *faza III: Tworzenie*, w której na podstawie wyników analiz mechanizmów adaptacyjnych organizmów żywych stworzono osiem koncepcji rozwiązań inspirowanych naturą, z których trzy zostały opracowane dokładniej. Rozdział zamyka *faza IV: Ewaluacja*, która stanowi ostatnią część wybranej metody prowadzenia badań. W fazie tej ocena została przeprowadzona w odniesieniu do „Zasad Życia”, które w całym procesie stawiane były jako aspiracyjne cele projektowe.

## **ROZDZIAŁ 7**

Rozdział siódmy stanowi podsumowanie pracy z przytoczonymi wnioskami oraz wskazaniem ograniczeń i dalszych możliwych kierunków badań.

Wstęp	Problematyka
Rozdział 1	Motywacja Cele projektowe
Rozdział 2	Metoda biomimikry
Rozdział 3	Środowisko
Rozdział 4	Architektura pustynna Wyzwania projektowe
Rozdział 5	Faza I – Ustalanie zakresu Faza II – Odkrywanie
Rozdział 6	Faza III – Tworzenie Faza IV – Ewaluacja
Rozdział 7	Wkład badań Ograniczenia i dalsze kierunki badań

Rys. 1-2 Schemat prezentujący układ pracy. Opracowanie własne.

## 1.9 STAN BADAŃ | ŹRÓDŁA KRAJOWE I ZAGRANICZNE

Poruszana w pracy tematyka wymaga przedsięwzięcia szerokiego spektrum studiów literaturowych z zakresu badań nad komfortem termicznym, bioklimatologią, architekturą wernakularną regionów pustynnych, czy biomimetyką i biomimikrą. Ze względu na charakter pracy w znacznej części swoich studiów autorka opierała się na literaturze zagranicznej, starając się, jeśli to możliwe, podkreślić również dotychczasowe dokonania krajowe.

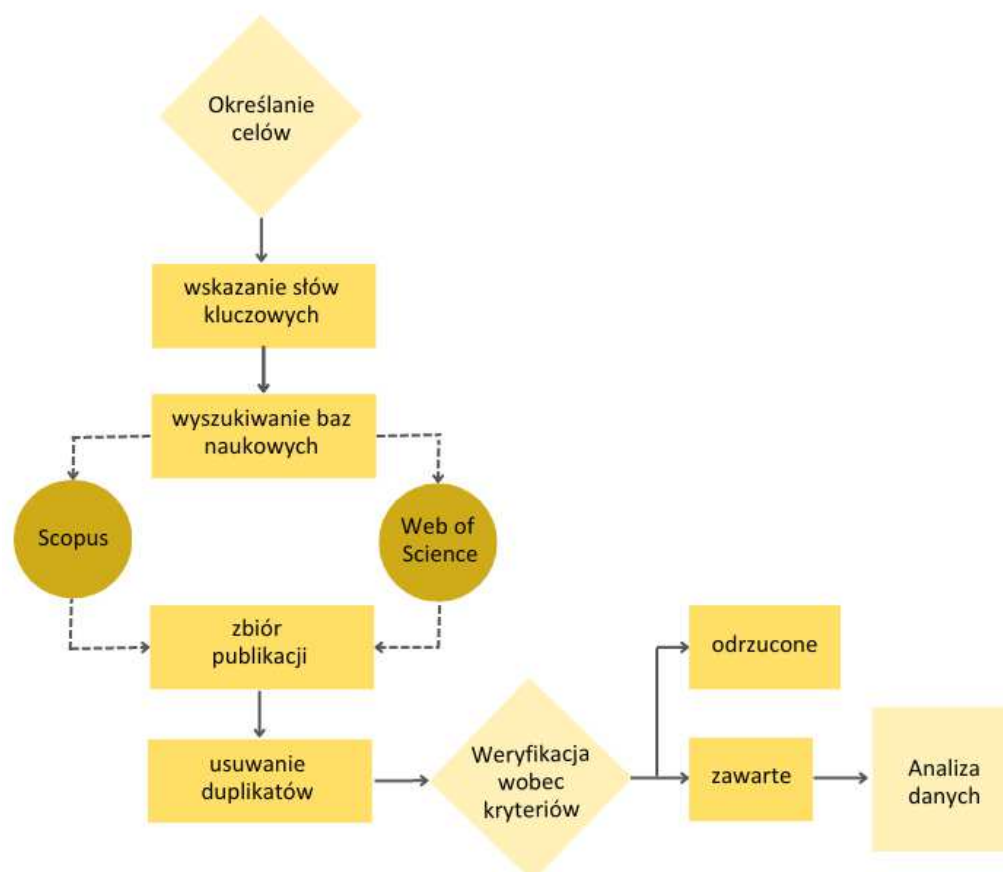
### 1.9.1 BIOMIMIKRA

Biomimikra jako dziedzina wiedzy jest jeszcze wciąż słabo rozpropagowana zarówno w Polsce, jak też na arenie międzynarodowej. Istnieją jednak centra badawcze, które skupione są na jej rozwijaniu. Należy do nich *Biomimicry Institute 3.8* skupiony na badaniu organizmów żywych, współpracy z firmami w celu tworzenia inspirowanych naturą rozwiązań, wspieraniu młodych, obiecujących biznesów skupionych na projektach inspirowanych naturą (m.in. nagroda Ray of Hope Prize) i kształceniu przyszłych praktyków biomimikry. W ramach edukacji Instytut we współpracy z College of Global Futures na Uniwersytecie Stanowym w Arizonie (ASU) prowadzi studia podyplomowe oraz program studiów magisterskich z biomimikry, którego uczestnikiem jest autorka rozprawy. Ponadto członkowie Instytutu stworzyli także dwuletni program dla specjalistów biomimikry przeznaczony dla wyróżniających się uczestników studiów magisterskich, do którego w 2022 roku rekomendowana była autorka. Innymi instytutami są: zlokalizowany również na ASU, *Center for Molecular Design and Biomimicry*, który zajmuje się projektowaniem materiałów inspirowanych naturą na poziomie molekularnym, czy też działający analogicznie do Biomimicry 3.8, *Biomimicry Research and Innovation Center* na Uniwersytecie Akron w stanie Ohio. Podobne centra badań są obecne również w Europie. Spośród nich wymienić można: *Collaborative Research Centre SFB-TRR 141* w Niemczech (Uniwersytety: Stuttgart – Tübingen – Freiburg), *FIT – Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies*, *the Bio-inspired Material National Centre of Competence in Research* w Szwajcarii (Uniwersytet we Fryburgu), *NGO 'Biomimicry Europa'* założone przez francuskich i belgijskich projektantów, architektów i biologów w celu promowania biomimikry, czy założony we Francji w 2014 roku *Ceebios*, zajmujący się edukacją, promowaniem i konsultowaniem biomimikry (57).

Wśród literatury naukowej znacznie częściej stosuje się jednak termin biomimetyka, który poniekąd może być używany jako synonim biomimikry. Istnieją także czasopisma, które poświęcone są wyłącznie tej dziedzinie. Wśród nich wyróżnić można: *Biomimetics* (MDPI), *Journal of Biomimetics Biomaterials and Biomedical Engineering* (Trans Tech Publications LTD) *Journal of Biomimetics Biomaterials and Tissue Engineering* (OMICS International), *Bioinspiration and Biomimetics* (IOP Publishing LTD), *Bioinspired biomimetic and nanobiomaterials* (ICE Publishing).

W ramach zawężania studiów literaturowych autorka przeprowadziła selekcję recenzowanych publikacji naukowych w oparciu o bazy Scopus i Web of Science. Proces ten zaprezentowano na rysunku 1-3. W rezultacie dla terminu biomimikra (*ang. biomimicry*) otrzymano 361 rekordów, podczas gdy dla biomimetyki (*ang. biomimetics*) wyświetlonych zostało 4 545 publikacji. Ograniczając tematykę do stosowania tych pojęć w dyscyplinie architektury autorka otrzymała odpowiednio 40 wyników dla biomimikry i 353 dla biomimetyki. Zawężając poszukiwania do publikacji poruszających problematykę fasad budynków inspirowanych naturą, uzyskano 2 publikacje odnoszące się do biomimikry oraz 3 dla biomimetyki. Przeprowadzając podobną

analizę w bazie Web od Science autorka dotarła do 23 publikacji, które odnoszą się do fasad budynków inspirowanych naturą, projektowanych zgodnie z założeniami biomimikry. Po usunięciu duplikujących się pozycji oraz weryfikacji ich zawartości (odrzuconiu pozycji niezwiązanych z projektami adaptowalnych fasad, kształtowaniem komfortu termicznego lub wizualnego), łącznie w oparciu o bazy internetowe autorka uzyskała 19 rekordów, z których dwa dotyczą adaptowalnych fasad projektowanych w klimacie gorącym i skrajnie suchym (BWh).



Rys. 1-3 Diagram blokowy PRISMA<sup>6</sup> podsumowujący proces selekcji artykułów. Opracowanie własne.

Wśród zweryfikowanych recenzowanych publikacji zawartych w zestawieniu przedstawionym w tabeli 1-1 zauważalny jest podział na prace przeglądowe i projektowe. Większość prac przeglądowych przedstawia różne podejścia stosowane w projektowaniu inspirowanym naturą, w tym w biomimikrze (58), (59), (60) lub dokonuje analiz istniejących koncepcji fasad naśladujących funkcjonowanie organizmów żywych (61), (62), (63), (64). Istotne zagadnienie poruszane w tych pracach stanowi wpływ analizowanych rozwiązań na optymalizację efektywności energetycznej (materiałów, budynków) (60), (65) lub komfortu termicznego (63).

<sup>6</sup> PRISMA (ang. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses) – deklaracja stworzona w celu właściwego raportowania przeglądów systematycznych i metaanaliz. Metoda polega na zarejestrowaniu całkowitej liczby artykułów znalezionych w trakcie wstępnego wyszukiwania, a następnie klarownym zaprezentowaniu procesu selekcji z zaznaczeniem aspektów, które wpłynęły na jego całkowity przebieg (290).

W pracach projektowych naukowcy skupiają się głównie na tworzeniu adaptowalnych fasad budynków – kinetycznych (66), (67), (68), (69), (70) lub strukturalnych (71), (72), (73), (74) z uwzględnieniem ich wpływu na optymalizację efektywności energetycznej, komfortu termicznego lub wizualnego. Część pozostaje na etapie abstrakcji zasad funkcjonowania organizmów żywych (58). Pozostałe jednak oparto na sprawdzaniu efektywności projektowanych rozwiązań poprzez analizy numeryczne (73) lub modelowanie parametryczne (68), (71), (72). W tym celu znaczną część badań przeprowadzono na modelach budynków istniejących, przeważnie biurowych (66), (69), (75), z których dwa zlokalizowane są w klimacie gorącym i skrajnie suchym (72), (76). W ramach niektórych badań budowane były także prototypy (70), (74), które umożliwiły sprawdzenie zasadności przyjętych założeń i zastosowanych rozwiązań technologicznych, jak też testowanie projektów w warunkach rzeczywistych.

Lp.	Autor i rok publikacji	Metoda badań	Obszar badań
1	2	3	4
1	Hertzsch, 2010 (65)	P	Zestawienie przykładów zastosowań materiałów tekstylnych w budynkach z rozwiązaniami występującymi w naturze, mogącymi inspirować projektantów, w odniesieniu do możliwości poprawy efektywności energetycznej budynków.
2	Hanafin i in. 2011 (71)	MP	Tworzenie eksperymentalnych systemów wsporczych elewacji w oparciu o formę i zasady działania mechanizmów obecnych w przyrodzie. Analiza zasad rozgałęziania się drzew.
3	El Ahmar I Fioravanti, 2015 (72)	MP + SK (EnergyPlus)	Badanie efektywności działania inspirowanej naturą podwójnej fasady aplikowanej na modelowanej elewacji istniejącego budynku biurowego, zlokalizowanego w Kairze (Egipt, typ klimatu BWh) w kontekście regulacji temperatury wewnątrz wybranego pomieszczenia biurowego.
4	Bouabdallah i in. 2016 (76)	B	Tworzenie projektu fasady kinetycznej inspirowanej naturą, wpływającej na optymalizację komfortu termicznego wewnątrz budynków w typie klimatu BWh. Badanie korzyści stosowania metodologii biomimikry.
5	Al-Obaidi i in. 2017 (61)	P	Zestawienie różnych metod projektowania inspirowanego naturą (m.in. biomimikry). Przegląd i analiza koncepcji adaptowalnych fasad inspirowanych naturą, jak też inteligentnych materiałów.
6	Lopez i in. 2017 (58)	P + B	Porównanie koncepcji fasad kinetycznych z fasadami kinetycznymi inspirowanymi naturą. Przedstawienie metodologii projektowania opartego na założeniach biomimikry w oparciu o prezentację dwóch mechanizmów adaptacyjnych roślin.
7	Webb i in. 2018 (75)	B + SK (TRNSYS)	Badanie efektywności projektowanej w oparciu o mechanizmy naturalne fasady zlokalizowanego w Melbourne (Australia, typ klimatu Cfb) budynku biurowego w kontekście optymalizacji komfortu termicznego wewnątrz pomieszczeń i obniżania temperatury przegrody.
8	Xing i in. 2018 (62)	P	Omówienie metodologii biomimikry na przykładzie ścian komórkowych roślin. Tworzenie systematyki projektów koncepcyjnych fasad inspirowanych ich budową i działaniem.

1	2	3	4
9	Hosseini i in. 2019 (63)	P	Zestawienie istniejących koncepcji fasad kinetycznych inspirowanych naturą w odniesieniu do ich formy, funkcji, efektywności energetycznej oraz możliwości wpływu na poprawę komfortu termicznego.
10	Sheikh i Asghar, 2019 (66)	BIM + AN (Ecotect)	Tworzenie projektu i badanie efektywności fasady kinetycznej inspirowanej naturą, aplikowanej na modelu elewacji istniejącego budynku biurowego w Lahaur (Pakistan, typ klimatu BSh) przy wykorzystaniu metodologii biomimikry.
11	Nalcaci i Nalcaci, 2020 (67)	B	Tworzenie projektu fasady kinetycznej inspirowanej naturą, wpływającej na optymalizację komfortu termicznego wewnątrz budynków. Badanie korzyści stosowania metodologii biomimikry.
12	Blanco i in. 2021 (59)	P	Analiza 16 francuskich projektów urbanistycznych inspirowanych naturą (m.in. powłok budynków), prowadzona w celu zidentyfikowania wykorzystywanych przez projektantów metodologii (np. biomimikry) oraz wyzwań towarzyszących procesowi tworzenia.
13	Hershovich i in. 2021 (73)	B + AN (CFD)	Tworzenie w oparciu o metodę biomimikry różnych geometrii płytek fasadowych, których działanie sprawdzane jest w oparciu o ciepłno-przepływowe analizy numeryczne.
14	Hosseini i in. 2021 (68)	B + MP	Tworzenie w oparciu o metodę biomimikry koncepcji fasady kinetycznej w odniesieniu do optymalizacji komfortu wizualnego.
15	Peeks i Badarnah, 2021 (74)	MP + PT	Tworzenie w oparciu o metodę biomimikry koncepcji różnych geometrii paneli fasadowych. Badanie projektowanych rozwiązań w odniesieniu do regulacji temperatury powierzchni paneli.
16	Anzaniyan i in. 2022 (69)	MP	Tworzenie koncepcji fasady kinetycznej w oparciu o metodę biomimikry. Badanie efektywności rozwiązania aplikowanego na modelowanej elewacji budynku biurowego w Teheranie (Iran, typ klimatu BWk) w kontekście komfortu termicznego oraz wizualnego.
17	Faragalla i Asadi, 2022 (64)	P	Analiza podejść wykorzystywanych w projektowaniu opartym na metodologii biomimikry w odniesieniu do koncepcji fasad adaptowalnych.
18	Sankaewthong i in. 2022 (70)	MP + PT	Tworzenie koncepcji fasady kinetycznej w oparciu o metodę biomimikry. Badanie efektywności rozwiązania poprzez analizy numeryczne i budowanie prototypu w kontekście komfortu wizualnego.
19	Varshabi i in. 2022 (60)	P	Zestawienie i analiza publikacji wykorzystujących metodologię biomimikry w architekturze w kontekście efektywności energetycznej.

**Tab. 1-1** Zestawienie publikacji odnoszących się do projektowanie inspirowanego naturą zgodnego z założeniami biomimikry, które zawiera prace przeglądowe (P) i eksperymentalne. Stosowane w nich metody badań oznaczono następującymi skrótami: B – biomimikra, BIM – modelowanie 3D (Revit), MP – modelowanie parametryczne (Grasshopper), PT – budowanie prototypów, SK – symulacje komputerowe (wybrane oprogramowanie). Oprac. własne.

Poza przeglądem baz internetowych przeprowadzono także własną kwerendę bibliograficzną, w efekcie której zidentyfikowano dodatkowe publikacje warte wymienienia. Wśród literatury krajowej na wyróżnienie zasługuje kilka publikacji Barbary Widery (77), (78), (79), (80), poruszających tematykę projektowania inspirowanego naturą, jak też dwie publikacje Marcina Brzezickiego, w których opisuje i dokonuje analizy zagranicznych koncepcji eksperymentalnych fasad budynków opartych na wzorcach organicznych (10), (81). Warto wymienić również pracę doktorską Jakuba Onyszkiewicza (82), omawiającą zagadnienie biomimetyki oraz podejmującą próbę wskazania jej elementów w polskich i zagranicznych konkursach architektonicznych. Wydaje się, że w Polsce zagadnienie metodologii projektowania inspirowanego naturą jest znacznie lepiej rozpoznawalne pod pojęciem bioniki, która jednak rzadko odnosi się do dziedziny architektury. Tu warto wspomnieć o publikacjach Andrzeja Samka z krakowskiego Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki (83), (84), które zostały opracowane z myślą o pomocy w przygotowywaniu zajęć dydaktycznych z zakresu bioniki, a także przekazywaniu wiedzy przyrodniczej oraz możliwości jej implementowania w celu rozwiązywania zagadnień technicznych.

Wśród literatury zagranicznej na uwagę zasługuje wiele pozycji, w tym książka *Innovation inspired by nature* napisana przez prekursorkę biomimikry Janine Benyus (9), a także podręcznik projektowania opartego na założeniach biomimikry stworzony przez Instytut Biomimikry (32). Inne publikacje to *Biomimikra w Architekturze* autorstwa Michaela Pawlyna (31), a także prace doktorskie Laury Lee Stevens (53), absolwentki studiów magisterskich z zakresu biomimikry oferowanych przez College of Global Futures na ASU, omawiającej zagadnienie biomimikry w kontekście edukacji architektonicznej oraz wspomnianej już Lidii Badarnah Kadri (30), proponującej w swojej dysertacji nową metodologię projektowania inspirowanego naturą, z myślą o tworzeniu adaptowalnych powłok budynków. Badarnah Kadri jest także autorką oraz współautorką szeregu innych publikacji poruszających tematykę biomimikry i biomimetyki (85), (86), (87). W jednej z nich, opracowując rozwiązanie mające na celu regulację temperatury wewnątrz budynków w regionach gorących i skrajnie suchych, prezentuje stworzoną w ramach swojej rozprawy doktorskiej metodologię (88).

Do tematyki poruszanej przez autorkę niniejszej pracy nawiązuje także praca magisterska Sary Khelil (34). Khelil przeprowadziła analizę efektywności rozwiązania projektowanego w oparciu o metodologię proponowaną przez Badarnah Kadri. Rozwiązanie to tworzone jest w odpowiedzi na problem wentylacji budynków w środowisku gorącym i suchym. Swoje badania oparła na metodzie studium przypadku połączonej z symulacjami komputerowymi. Obiektem jej badań był budynek wielorodzinny zlokalizowany w Biskrze w Algierii. Uzyskane wyniki dowiodły, że proponowany w publikacji pasywny system inspirowany naturą istotnie wpływa na poprawę przepływu powietrza wewnątrz budynku, a tym samym usprawnia jego wentylację, eliminując potrzebę korzystania z wentylacji mechanicznej. We wnioskach Khelil podkreśla jednak, że efektywność działania wentylacji naturalnej jest wysoce uzależniona od geometrii budynku i naturalnych uwarunkowań. Dlatego też projektanci, którzy chcą korzystać z podobnych rozwiązań, powinni już na etapie wczesnego planowania brać pod uwagę kilka dodatkowych czynników, takich jak chociażby dominujący kierunek wiatrów.

Wśród dotychczasowych badań Khelil wraz z zespołem (54) opracowała także bio-kinetyczny system, pozwalający na zacienianie fasad budynków w środowisku gorącym i suchym. Inspiracją



dla naukowców był mechanizm zamykania i otwierania kwiatów wilca purpurowego (*Ipomoea purpurea*). W procesie tworzenia badacze posłużyli się optymalizacją opartą na algorytmach ewolucyjnych przy wykorzystaniu programu Grasshopper dla oprogramowania do tworzenia modeli 3D w środowisku programu Rhino. Przepływowe analizy numeryczne zostały przeprowadzone na teoretycznym modelu fasady budynku biurowego przy uwzględnieniu warunków klimatycznych panujących w Biskrze. Wyniki badań wykazały, że przy zastosowaniu proponowanego rozwiązania zaobserwowano zredukowanie strefy przegrzania o 3°C do 3,7°C, co istotnie wpłynęło na poprawę charakterystyki energetycznej budynku.

### 1.9.2 ARCHITEKTURA – KLIMAT GORĄCY I SKRAJNIE SUCHY A KOMFORT TERMICZNY

Jedną z zasad projektowania biomimetycznego jest odnoszenie się do kontekstu projektowego, stąd tak ważna jest analiza zarówno środowiska naturalnego, jak też zbudowanego. W tym przypadku autorka niniejszej pracy skupiła się na analizie architektury wernakularnej regionów pustynnych, która przez wieki umożliwiała uzyskanie akceptowalnego przez użytkowników komfortu termicznego wewnątrz budynków bez konieczności używania wentylacji mechanicznej. Przez wzgląd na specyfikę w literaturze krajowej jest to zagadnienie poruszane raczej rzadko. Pojawiające się w kraju publikacje dotyczą zwykle architektury świątynnej starożytnego Egiptu, bądź terenów dawnego Imperium Rzymskiego. Jedną z pozycji, którą z pewnością należy wymienić jest praca doktorska Ewy Grabowskiej (89), traktująca o urbanistycznych problemach amerykańskich miast na pustyni. W ramach wniosków formułuje ona propozycje zmian, jakie można by wprowadzić do strategii rozwoju miast pustynnych, które pozwoliłyby przystosować je do panujących w tych regionach warunków klimatycznych.

Znacznie bardziej bogata w tym zakresie jest literatura zagraniczna. Choć zainteresowanie zagadnieniem komfortu cieplnego pojawiło się na początku XX wieku, badacze podkreślają, że w porównaniu do innych stref klimatycznych, ilość badań poświęconych tematyce kształtowania komfortu termicznego wewnątrz budynków w regionach pustynnych jest wciąż niewystarczająca. Jednym z przykładów może być brak publikacji poruszających kwestię funkcjonowania coraz częściej budowanych całkowicie przeszklonych budynków wysokościowych, które muszą być klimatyzowane mechanicznie. Wyniki badań terenowych prowadzonych w środowisku gorącym, skrajnie suchym opisuje w swojej książce Foruzanmehr (17). Jeden z wniosków do jakiego doszedł po ich analizie wskazuje, że to właśnie temperatura oraz jej zmiany, a nie wilgotność i ruch powietrza, mają największy wpływ na kształtowanie odczuwalnego komfortu cieplnego. Dotychczasowy stan badań w tym zakresie został dokładniej zaprezentowany w rozdziale 4.3.

W ostatnich latach zauważalne jest coraz większe zainteresowanie prowadzeniem badań w oparciu o metodę analiz numerycznych (symulacji komputerowych), które niekiedy prowadzone są wespół z badaniami terenowymi. Wybrane publikacje, w których opisywane badania oparte były na tych metodach zostały przedstawione w tabeli 1-2.

Lp.	Autor i rok publikacji	Metoda badań	Badany region	Typ klimatu*	Zakres badań
1	2	3	4	5	6
1	Gado i Osman, 2009 (90)	BT + SK	New Al-Minya, Egipt	BWh	<b>bud. mieszkalne wielorodzinne</b> – badanie efektywności działania pasywnych metod wentylacji
2	Sheta, 2011 (91)	BT + SK	Kair, Egipt	BWh	<b>bud. mieszkalne wielorodzinne</b> – badanie efektywności termicznej materiałów budowlanych
3	Sedki i in. 2013 (92)	SK	Kair, Egipt	BWh	<b>bud. mieszkalne wielorodzinne</b> – badanie wpływu orientacji bud. na komfort termiczny w ich wnętrzach
4	Sedki, 2014 (16)	BT + SK	Kair, Egipt	BWh	<b>bud. mieszkalne wielorodzinne</b> – optymalizacja komfortu term. wew. bud. przez badanie łączenia różnych kombinacji strategii naturalnej wentylacji i technik modernizacji izolacji
5	Dabaieh i in. 2015 (93)	SK	Kair, Egipt	BWh	<b>bud. mieszkalne wielorodzinne</b> – badanie pasywnych rozwiązań dachów w kontekście optymalizacji komfortu term. wew. bud.
6	Beckett i in. 2017 (94)	BT + SK	Kaloorlie, Australia	BSh	<b>bud. mieszkalne jednorodzinne</b> – badanie wpływu technologii ziemi ubijanej w szalunkach ( <i>ang. rammed earth</i> ) na kształtowanie komfortu term. wew. budynków
7	Benzarti Ghedas, 2017 (49)	SK	Susa, Tunezja	BSh	<b>bud. mieszkalne jednorodzinne</b> – badanie efektywności termicznej budownictwa tradycyjnego w porównaniu do standardowego
8	Wahl, 2017 (95)	SK	Jeddah i Al-Riyadh, Arabia Saudyjska	BWh	<b>bud. mieszkalne jednorodzinne</b> – badanie efektywności energetycznej modelowego budynku poprzez różne modyfikacje przegród i elementów
9	Shehata i Waheeb, 2018 (96)	SK	Mekka, Arabia Saudyjska	BWh	<b>bud. mieszkalne jednorodzinne, kampus</b> – badanie efekt. energet. i komfortu term. wewnątrz bud.
10	Vethanayagam i Abu-Hijleh, 2019 (97)	SK	Dubaj, ZEA	BWh	<b>bud. handlowe</b> – badanie wpływu wybranych elementów budynku na efektywność energetyczną atriów; definiowanie optymalnych parametrów atriów
11	Al-Qahtani i Elgizawi, 2020 (98)	SK	Al-Riyadh, Arabia Saudyjska	BWh	<b>Bud. mieszkalne jednorodzinne</b> – badanie wpływu wybranych strategii pasywnych na kształtowanie efektywności energetycznej i komfortu term. wew. bud.
12	Bencheikh i Bederina, 2020 (99)	BT + SK	Laghouat, Algieria	BWh	<b>bud. mieszkalne jednorodzinne</b> – porównanie charakterystyki termicznej dwóch budynków, tradycyjnego z nowoczesnym o niskich dochodach

1	2	3	4	5	6
13	Reyes-Barajas i in. 2020 (100)	SK	Mexicalli, Meksyk	BWh	<b>bud. mieszkalne jednorodzinne</b> – badanie wpływu wybranych technik pasywnych na kształtowanie efektywności energetycznej i komfortu term. wew. bud.
14	Soflaei i in. 2020 (101)	MP + SK	Phoenix, Arizona, USA	BWh	<b>bud. mieszkalne jednorodzinne</b> – badanie różnych wariantów projektów dziedzińców pod względem kształtowania komfortu termicznego wew. bud.
15	Amraoui i in. 2021 (102)	BT + SK	Al-Wadi, Algieria	BWh	<b>bud. mieszkalne wielorodzinne</b> – badanie wpływu lokalnych, tradycyjnych technik pasywnych na kształtowanie komfortu termicznego wew. bud.
16	Khan i in. 2021 (39)	SK	Maskat, Oman	BWh	<b>bud. mieszkalne jednorodzinne</b> – badanie wpływu naturalnej wentylacji na kształtowanie komfortu term. wew. zabudowy tradycyjnej
17	Salih i in. 2021 (103)	SK	Duhok, Irak	BSh	<b>bud. mieszkalne jednorodzinne</b> – badanie efektywności energetycznej i komfortu term. wew. wybranego obiektu
18	Taleb i Abumoeilak, 2021 (104)	BT + SK	Dubaj, ZEA	BWh	<b>bud. mieszkalne jednorodzinne</b> – badanie czterech różnych wariantów dziedzińców pod względem kształtowania komfortu term. wew. bud.
19	William i in. 2021 (105)	SK	Kair, Egipt	BWh	<b>bud. edukacyjne</b> – badanie efektywności powłok budynków pod względem ich oddziaływania na środowisko, kosztów i kształtowania komfortu term. wew. bud.
20	Lahmar i in. 2022 (106)	MP	Biskra, Algieria	BWh	<b>bud. mieszkalne wielorodzinne</b> – badanie wpływu stosowania szyb elektrochromatycznych na efektywność energetyczną bud.
21	Athmani i in. 2023 (107)	BT + SK	Biskra, Algieria	BWh	<b>bud. mieszkalne jednorodzinne</b> – badanie efektywności termicznej różnych rozwiązań dachów

**Tab. 1-2** Zestawienie publikacji dotyczących badania komfortu termicznego w regionach gorących i skrajnie suchych. Oznaczenia stosowanych przez autorów metod badań: BT – badania terenowe, MP – modelowanie parametryczne, SK – symulacje komputerowe (wybrane oprogramowanie). \*Typ klimatu opisano w odniesieniu do klasyfikacji klimatów Koppena. Opracowanie własne.





# 2

## Biomimikra

### Założenia i narzędzia

## 2 BIOMIMIKRA

---

### 2.1 WPROWADZENIE | FILOZOFIA BIOMIMIKRY

Zgodnie z definicją Janine Benyus (9) biomimikra zajmuje się *badaniem najbardziej udanych rozwiązań w przyrodzie, a następnie naśladowaniem tych wzorów i procesów w celu rozwiązywania problemów ludzkości*. Podejście to ma charakter interdyscyplinarny, łącząc w sobie pozornie dwa odległe zagadnienia natury i technologii. Jednak biomimikra to nie tylko innowacyjna, prężnie rozwijająca się dziedzina wiedzy, ale również nowa filozofia, objawiająca się poprzez specyficzny sposób postrzegania świata. Filozofia ta opiera się na świadomym powrocie człowieka do natury i zmiany nastawienia w stosunku do otaczającej nas przyrody. To właśnie szacunek dla życia i etos, rozumiany jako właściwy sposób postępowania, stanowią fundamenty biomimikry (32). Dzięki tym cechom możliwe jest dążenie do osiągnięcia harmonii w relacji pomiędzy człowiekiem a naturą. Można zatem stwierdzić, że pojęcie „biomimikry” obejmuje nie tylko dziedzinę wiedzy, czy filozofię, ale także normy etyczne, konkretne nastawienie i postawę wobec przyrody oraz oparte o nie metodę i podejście do rozwiązywania problemów.

### 2.2 PODEJŚCIE | ZAŁOŻENIA I NARZĘDZIA

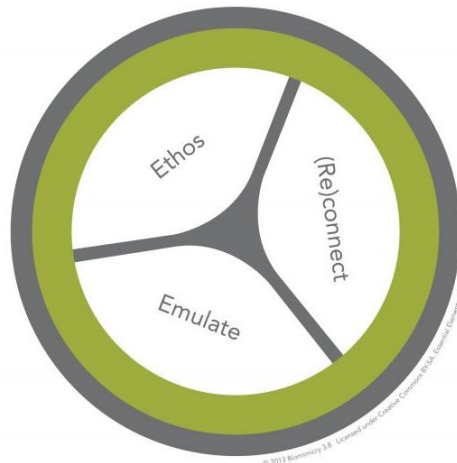
Powołując się na słowa Benyus (9) podstawowym założeniem biomimikry jest *odejście od nauki o biologii do uczenia się od natury*. Istotą biomimikry stanowi promowanie życia oraz tworzenie warunków sprzyjających jego rozwojowi. Zgodnie z tymi założeniami instytut Biomimicry 3.8 wyróżnił trzy elementy stanowiące integralne fundamenty tej dziedziny prezentowane na rysunku 2-1<sup>7</sup>:

- (i) **etos** (*ang. ethos*), będący zbiorem norm, postaw i wartości moralnych;
- (ii) **ponowne połączenie** (*ang. re-connection*), rozumiane jako przywrócenie więzi między człowiekiem a naturą, będące zauważalnym odniesieniem do koncepcji biofilii (108) i różnych form nastawienia człowieka do natury opisywanymi przez Kellerta (109);
- (iii) **świadome, aktywne naśladowanie przyrody** (*ang. emulation*) (32).

Istotą praktykowania biomimikry jest zmiana sposobu postrzegania świata ze ściśle antropocentrycznego, według którego człowiek stanowi centrum i miarę wszechświata, na bardziej biocentryczny, zgodnie z którym wszystkie żywe istoty posiadają wartość (110), a zatem zasługują na ludzką troskę, uwagę i szacunek (111). Patrząc na naturę poprzez pryzmat antropocentryzmu dostrzegamy głównie „usługi”, jakie natura świadczy człowiekowi poprzez stwarzanie przestrzeni do rekreacji, czy bycie źródłem wody, tlenu, materiałów budowlanych, żywności lub paliw. Wszystko to stanowi wyłącznie instrumentalną wartość przyrody (112). Warto jednak zwrócić uwagę na to, że natura sama w sobie jest samowystarczalna lub samoistnie potrafi adaptować się do nieustannie zmieniających się warunków. Jest to dowodem tego, że ma ona większy potencjał, które Taylor (110) określa mianem „wrodzonej wartości”.

---

<sup>7</sup> Ilustracje zawarte w tym rozdziale zostały udostępnione do publikacji za uprzejmością instytutu Biomimicry 3.8. Instytut zastrzegł sobie jednak prawo do ich tłumaczenia na inne języki. Z tego względu są one publikowane w wersji oryginalnej – anglojęzycznej.



**Rys. 2-1** Trzy nierozłączne elementy niezbędne do właściwego praktykowania biomimikry: etos, ponowne połączenie i świadome naśladowanie. Za uprzejmością: Biomimicry 3.8, 2022.

Praktyka biomimikry polega na tworzeniu zrównoważonych rozwiązań inspirowanych naturą. Przyrodę można poznawać na co najmniej trzech „poziomach”: form, procesów oraz systemów (32), (34). Możliwe jest to poprzez obserwację, zrozumienie, a także umiejętne naśladowanie zasad budowy naturalnych form, mechanizmów kierujących procesami oraz sposobu funkcjonowania ekosystemów. Jednak kluczowe w odwzorowaniu złożoności natury, które pozwala na stworzenie warunków sprzyjających rozwojowi życia, jest zrozumienie powiązań zachodzących pomiędzy wspomnianymi „poziomami” przyrody. To właśnie umiejętność przystosowania się organizmów do określonych warunków kształtowanych przez naturalne ograniczenia, nazwane przez Benyusa „systemem operacyjnym Ziemi”<sup>8</sup> (*ang. Earth’s Operating System*) sprawiła, że były one w stanie przetrwać i rozwijać się (113).

### 2.2.1 „ZASADY ŻYCIA”

Obserwując ekosystemy ziemskie zauważyć można pojawiające się w nich wyraźne zasady oraz wzorce. Przez cały proces ewolucji reguły te zostały wykształcone w wyniku dostosowywania poszczególnych powiązanych i ściśle uzależnionych od siebie mechanizmów do naturalnych ograniczeń, określających warunki funkcjonowania życia na Ziemi (*ang. Earth’s operating conditions*) (114). To właśnie dzięki tym zasadom, sprzyjającym trwałości oraz integralności systemów, poszczególne elementy składowe ekosystemów współtworzą wysoce zrównoważone, spójnie funkcjonujące środowisko. Dla projektantów reguły te stanowią zatem punkt wyjścia do tworzenia zrównoważonych rozwiązań (82), będących odpowiedzią na problemy ludzkości, a jednocześnie niewyrządzających szkody środowisku naturalnemu. W swojej pracy (9) Benyus wymieniła kilka z tych zależności występujących w ekosystemach naturalnych, zgodnie z którymi człowiek tworząc rozwiązanie powinien myśleć o:

<sup>8</sup> *System operacyjny Ziemi* – stanowi pewien zbiór ograniczeń, które określają warunki funkcjonowania życia na Ziemi, biosfery traktowanej jako zamknięty system. W zbiorze tym zawarte są: woda, atmosfera, światło słoneczne, będące źródłem energii, grawitacja, cykliczność zjawisk oraz stan dynamicznej równowagi, polegający na dążeniu do zachowania balansu pomimo ciągle zachodzących w środowisku zmian. Ograniczenia te stanowią globalne czynniki warunkujące życie na Ziemi, jednak w zależności od lokalnego kontekstu każdy z nich oddziałuje na to życie inaczej, zarówno w czasie jak i przestrzeni (32). Niezależnie od tego wszystkie organizmy występujące na Ziemi, w tym również ludzie, muszą się do nich przystosować w celu przetrwania.

- (i) wydajności i ograniczaniu zużycia energii oraz bazowaniu wyłącznie na dostępnych, nieograniczonych jej źródłach;
- (ii) zamkniętym obiegu produktu: oszczędnym wykorzystywaniu i przetwarzaniu wszystkich materiałów oraz traktowaniu odpadów jako zasobów;
- (iii) możliwościach naprawy, samoregulowania i adaptowania do zmian;
- (iv) optymalizowaniu, nie zmaksymalizowaniu;
- (v) tworzeniu spójnego systemu, a nie odrębnego produktu;
- (vi) współpracy, a zatem wzajemnym odbieraniu i przekazywaniu informacji;
- (vii) braku emisji toksycznych związków, zamiast tego wykorzystywaniu materiałów oraz procesów chemicznych bezpiecznych dla środowiska i ludzi;
- (viii) wykorzystywaniu lokalnych, powszechnie dostępnych zasobów;
- (ix) tworzeniu lokalnie wyspecjalizowanych rozwiązań;
- (x) projektowaniu formy dostosowanej do funkcji.

W oparciu o zależności wymienione przez Benyusa, zasady zawarte w książce *The Way Life Works* Mahlona Hoaglanda (115) oraz prowadzone przez Instytut Biomimikry badania stworzony został późniejszy paradygmat projektowania, będący przedstawieniem panujących w przyrodzie reguł, które pozwalają na zbalansowany, ciągły rozwój życia na Ziemi. Te fundamentalne zasady zwane „Zasadami Życia” (*ang. Life's Principles*) traktowane są przez praktyków biomimikry jako wzorzec projektowy zaczerpnięty z natury.

Zgodnie z założeniami biomimikry wspomniane zasady stanowią również pewien rodzaj celów aspiracyjnych, a tym samym miary realizacji zamierzenia, jakim jest tworzenie rozwiązań (produktów, procesów, czy norm) promujących życie (*ang. create conditions conducive to life*). Dzięki nim projektanci są w stanie sprawdzić, w jakim stopniu tworzone przez nich rozwiązanie jest dopasowane do naturalnych ograniczeń oraz możliwości (116). Brak spełnienia jednego z tych warunków sprawia, że dane rozwiązanie staje się wadliwe tak indywidualnie, jak i w kontekście prawidłowego funkcjonowania całego systemu, którego integralną część stanowi. Tym samym zintegrowanie wszystkich zasad w tworzonego rozwiązania przy uwzględnieniu jego wpływu na działanie całego systemu pozwala na zapewnienie jego użyteczności, trwałości oraz nieszkodliwości w całym cyklu życiowym (*ang. product life-cycle*). Prezentowany na rysunku 2-2 diagram przedstawia zbiór sześciu powiązanych ze sobą reguł, wraz z przypisanymi do nich dwudziestoma podzasadami wspólnie warunkującymi życie w naturze (32). Do głównych wzorców należą:

- (i) **ewoluowanie w celu przetrwania** (*ang. evolve to survive*) – utrzymanie ciągłej wymiany i obiegu informacji, aby zapewnić prawidłowe i trwałe działanie;
- (ii) **adaptacja do zmiennych warunków** (*ang. adapt to changing conditions*) – właściwe reagowanie na ciągle zachodzące dynamiczne zmiany w otoczeniu;
- (iii) **dostosowanie do lokalnych warunków i reagowanie na nie** (*ang. be locally attuned and responsive*) – wpasowywanie się w system i integrowanie się z nim;
- (iv) **używanie nieszkodliwej dla życia chemii** (*ang. use life-friendly chemistry*) – stosowanie środków, które wspierają procesy życiowe;
- (v) **oszczędzanie zasobów, materiałów i energii** (*ang. be resource efficient – material and energy*) – umiejętne i konsekwentne zarządzanie dostępnymi zasobami oraz możliwościami;
- (vi) **integrowanie rozwoju ze wzrostem** (*ang. integrate development with growth*) – optymalne inwestowanie w strategię, które promują zarówno wzrost, jak też rozwój.





Rys. 2-2 „Zasady Życia” (ang. *Life Principles*), traktowane przez praktyków biomimikry jako lekcje projektowania zaczerpnięte z natury, cele aspiracyjne oraz wzorzec i miara zrównoważonego rozwoju. Za uprzejmością: Biomimicry 3.8, 2022.

## 2.2.2 STRATEGIE PROJEKTOWE

Praktykowanie biomimikry poprzez prowadzenie badań oraz projektowanie opiera się na przechodzeniu przez poszczególne fazy:

- (i) **ustalanie zakresu** (*ang. scoping*) – celem tej fazy jest zidentyfikowanie problemu, bądź potrzeby – realnego wyzwania, oraz wyznaczenie kryteriów w odniesieniu do kontekstu projektowego przy uwzględnieniu wszelkich występujących w nim ograniczeń. Tym samym fazę tę można określić mianem tworzenia programu projektowego, w którym określone zostały również cele aspiracyjne, priorytety oraz standardy działania;
- (ii) **odkrywanie** (*ang. discovering*) – nieodłączną część tej fazy stanowi poszukiwanie oraz badanie istniejących rozwiązań – naturalnych modeli – traktowanych jako potencjalne źródło inspiracji. Badania te można realizować zarówno w formie badań terenowych, jak również poprzez przeprowadzanie studiów literaturowych, wywiadów, czy analizę internetowych baz danych;
- (iii) **tworzenie** (*ang. creating*) – to faza ideowa, której celem stanowi opracowanie nowego lub ulepszonego projektu dostosowanego do ludzkiej skali. W trakcie tej fazy powstaje duża liczba pomysłów inspirowanych naturalnymi strategiami, mechanizmami, czy procesami, które są następnie dopracowywane. Często, już na tym etapie tworzone lub modelowane są prototypy wybranych rozwiązań, pozwalające na ich porównywanie;
- (iv) **ocenie** (*ang. evaluating*) – stanowi fazę zamykającą cykl projektowy. W jej wyniku dochodzi do oceny efektywności oraz opłacalności danego rozwiązania w całym jego cyklu życiowym w odniesieniu do kontekstu projektowego. Przeprowadzona ocena umożliwia zidentyfikowanie niewykorzystanych możliwości oraz ograniczeń, jak też weryfikację stopnia osiągnięcia ustalonych wcześniej priorytetów i standardów. Dzięki temu wnioski wyciągnięte z analizy mogą posłużyć dalszemu udoskonalaniu produktu.

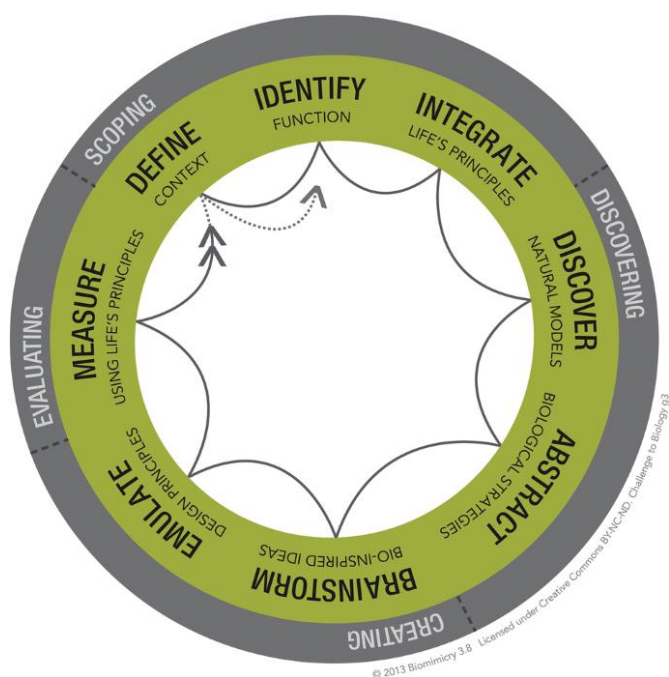
Powyższe opisy poszczególnych faz wskazują na to, że praktyka biomimikry sama w sobie jest niezwykle zbliżona do kolejnych etapów obecnych w tradycyjnym procesie projektowania architektonicznego. Jednak, jak podkreśla jeden z uczestników badań prowadzonych przez Danielle Brodrick (117), główna różnica tkwi w zmianie nastawienia projektanta. Gdy przestaje on zadawać sobie pytanie co chce zaprojektować, a zamiast tego pyta o to, jaką właściwie funkcję ma pełnić tworzone przez niego rozwiązanie.

Kolejność przechodzenia przez wyróżnione w poszczególnych fazach etapy, a tym samym przebieg całego procesu, zależne są od indywidualnego podejścia do prowadzenia badań. W tym wypadku wyróżniane są dwie strategie:

- (i) **Projektowanie odnoszące się do biologii** (*ang. Challenge to Biology*), polegające na definiowaniu wyzwania projektowego, a następnie poszukiwaniu sposobu jego rozwiązania poprzez odkrywanie mechanizmów występujących w naturze (patrz: Rys. 2-3);
- (ii) **Biologia determinująca projekt** (*ang. Biology to Design*), gdzie wcześniej odkryta strategia adaptacyjna zostaje przekształcona w rozwiązanie służące człowiekowi (patrz: Rys. 2-4).

Jednak jak podkreśla Rahşan Karabetça (118) niezależnie od wybranego podejścia zrozumiałe przekazywanie informacji z zakresu nauk przyrodniczych stanowi niezbędny element procesu projektowego, ukierunkowanego na tworzenie doskonałej relacji między człowiekiem, miejscem oraz naturą. Schematy (patrz: Rys. 2-3, Rys. 2-4) prezentujące obie strategie przedstawione są w formie okręgów z uwagi na to, że sam proces projektowy stanowi swego rodzaju powtarzalny cykl. Dążenie projektantów do tworzenia rozwiązań naśladujących naturę, a poprzez to realizujących wszystkie „Zasady Życia” prowadzi do tego, że sam proces jest wielokrotnie powtarzany w związku z nieustanną potrzebą udoskonalania produktu w oparciu o wyniki oraz wnioski wyciągane z jego oceny.

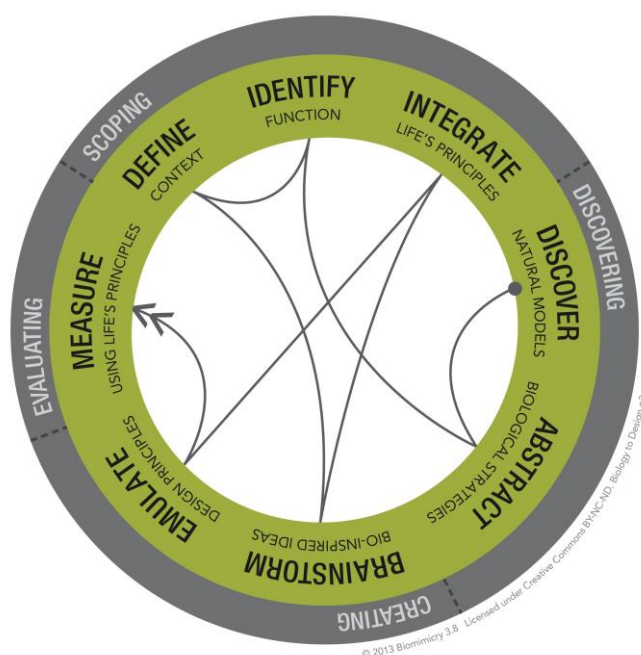
W pierwszej strategii projektowej, którą posługuje się również autorka niniejszej pracy, proces projektowy rozpoczyna faza ustalania zakresu. W tym celu najpierw dochodzi do zdefiniowania kontekstu (*ang. define context*) – określenia problemu projektowego lub ludzkiej potrzeby – a następnie docelowej funkcji, jaką ma pełnić rozwiązanie (*ang. identify function*). Ostatni etap tej fazy stanowi ustalenie naturalnych wzorców, „Zasad Życia”, do realizacji których się aspiruje w danym cyklu (*ang. integrate Life’s Principles*). Dopiero potem następuje poszukiwanie analogii w przyrodzie (*ang. discover natural models*) – wzorców rozwiązań (strategii, mechanizmów, procesów) wśród liderów ewolucji, których przetrwanie zależało od rozwiązania zdefiniowanego przez projektanta wyzwania – co wymaga nawiązania współpracy ze specjalistami nauk przyrodniczych. Metoda myślenia analogicznego pozwala na łączenie dwóch wydawałoby się odmiennych kontekstów – technologii i natury. Zamierzony efekt wspomnianych poszukiwań stanowi znalezienie odpowiedzi na to, w jaki sposób dany problem rozwiązany jest w świecie przyrody, co wymaga od projektantów poznania zasad działania wybranych strategii, mechanizmów bądź procesów występujących w naturze. Dalsze kroki są niemal identyczne, a w związku z tym opisane w procesie przebiegu drugiej metody prowadzenia badań.



Rys. 2-3 Strategia projektowa: od Wyzwania do Biologii (*ang. Challenge to Biology*).  
Za uprzejmością: Biomimicry 3.8, 2022.

W przeciwieństwie do pierwszej strategii, w drugiej metodzie motyw dla rozpoczęcia badań stanowią odkryte wcześniej strategie, mechanizmy bądź procesy występujące w przyrodzie. To właśnie ogólna wiedza o ich sposobie działania inicjuje dalszą pracę, którą rozpoczyna faza odkrywania. W drugiej metodzie współpraca w zespole interdyscyplinarnym ma miejsce od samego początku. Efektem badań prowadzonych podczas tej fazy jest poszerzenie wiedzy, a tym samym poznanie zasady działania badanego mechanizmu (*ang. discover natural models*) oraz właściwe jej przekazanie (*ang. abstract biological strategies*). Na podstawie tych odkryć możliwe jest dokładne określenie funkcji jaką pełni wybrany mechanizm (*ang. identify function*), a następnie odniesienie jej do ludzkiego kontekstu projektowego (*ang. define context*).

Konkretne zdefiniowanie potrzeby, która może być spełniona dzięki zasadom działania mechanizmów naturalnych, umożliwia przejście do etapu koncepcyjnego tzw. „burzy mózgów” (*ang. brainstorm bio-inspired ideas*), będącej częścią fazy tworzenia. W efekcie stworzony zostaje zestaw potencjalnych rozwiązań. Następnie w oparciu o „Zasady Życia” ustalane są priorytety – naturalne wzorce, do których realizacji aspiruje projektant w danym cyklu (*ang. integrate Life's Principles*). W oparciu o nie oraz wcześniejsze pomysły tworzone jest rozwiązanie, które jest odpowiedzią na kryteria stawiane w przebiegu procesu projektowego (*ang. emulate design principles*). „Zasady Życia” służą również jako narzędzie w ostatniej fazie, podczas której oceniana jest miara osiągniętego sukcesu (*ang. measure using LP's*) – stopień trwałości oraz adekwatności tworzonych rozwiązań. Tym samym wskazane są dalsze kierunki rozwoju na podstawie zidentyfikowanych ograniczeń i niezrealizowanych możliwości. Wnioski osiągnięte z oceny stanowią wskazówki projektowe w odniesieniu do kolejnego cyklu projektowego przedsięwziętego z zamiarem udoskonalania tworzonych produktów.



**Rys. 2-4** Strategia: projektowanie informowane biologią (*ang. Biology to Design*).  
Za uprzejmością: Biomimicry 3.8, 2022.

Niezależnie od wybranej metodologii prowadzenia badań, poza umiejętnością zadawania właściwych pytań, najtrudniejszy i wymagający największej praktyki element tego ośmio-etapowego procesu stanowi przekształcanie wiedzy zaczerpniętej z natury w przekaz zrozumiały dla projektantów innych dziedzin (*ang. abstract biological strategies*). W biomimikrze przekaz ten nazywany jest abstrakcyjną zasadą projektowania (*ang. abstracted design principle*). Adekwatna dla określonego odbiorcy – projektanta – treść jest w tym wypadku pozbawiona terminologii przyrodniczej oraz ograniczona do niezbędnego minimum informacji. To sprawia, że staje się ona przystępna. Najprościej ujmując, abstrakcyjna zasada projektowania jest dostosowanym do odbiorcy przekazem zasady działania badanego mechanizmu naturalnego, przedstawionym w sposób jak najbardziej zwięzły, zrozumiały oraz pobudzający wyobraźnię projektantów. To właśnie ta wymiana informacji daje projektantom możliwość implementowania wiedzy zaczerpniętej z natury do swoich projektów.

### 2.2.3 TAKSONOMIA

Wykorzystywane w praktyce biomimikry narzędzie zwane taksonomią<sup>9</sup> jest stworzonym przez Instytut Biomimikry systemem klasyfikacji, który porządkuje występujące w przyrodzie strategie, mechanizmy oraz procesy według pełnionej przez nie funkcji. System ten został wykorzystany do organizacji bazy danych na nieustannie rozwijanym portalu AskNature.org, stanowiącym niezastąpione źródło informacji do rozpoczęcia poszukiwań i badań w celu odkrycia zasad funkcjonowania mechanizmów naturalnych. Zarówno portal, jak też będące jego częścią opisywane narzędzie są niezwykle pomocne w procesie projektowym. Szczególnie w momencie odkrywania naturalnych modeli, gdy projektanci stawiają sobie pytanie: „W jaki sposób natura rozwiązałaby konkretny problem?”. Niekiedy, by rozszerzyć możliwości, warto również zapytać jak natura by nie postąpiła. Dlatego też, tak bardzo istotne jest prawidłowe zdefiniowanie kontekstu oraz właściwe zidentyfikowanie funkcji, jaką mają pełnić mechanizmy naturalne wykształcone przez badane organizmy. Aby – z jednej strony – funkcja ta nie była zbyt szeroka i umożliwiała zidentyfikowanie odpowiednich strategii, – a z drugiej zaś – nie ograniczała poszukiwań z powodu zbyt wąskiego jej zawężenia.

Samo narzędzie stanowi pewnego rodzaju pomost między dwoma światami nauk: przyrodniczych i technicznych, będąc jednym ze sposobów rozumiałej wymiany informacji pomiędzy nimi. Prezentowany diagram (patrz: Rys. 2-5) jest tym bardziej czytelny, gdyż w trakcie jego tworzenia przy opisie funkcji występujących w przyrodzie posługiwano się terminologią adekwatną dla projektantów różnych dziedzin. To właśnie podążanie za właściwie sformułowaną funkcją, pełnioną przez mechanizmy adaptacyjne organizmów żywych, stanowi rdzeń praktyki biomimikry. Poprzez zadawanie właściwych pytań: „dlaczego” (funkcja) i „jak” (strategia) działają występujące w przyrodzie mechanizmy, projektanci zachęceni są do myślenia w nowy sposób, prowadzący do tworzenia innowacyjnych i trwałych rozwiązań, które nie wywierają negatywnego wpływu na otoczenie.

---

<sup>9</sup> Jak podaje Czermińska (286) termin „taksonomia” pochodzi od dwóch grackich słów *taxis* – układ i *nomos* – prawo, zasada. Autorka wskazuje jednocześnie, że tym samym dyscyplina ta dotyczy *zasad i procedur klasyfikacji (porządkowania, grupowania, dyskryminacji, delimitacji, podziału) różnego typu obiektów*. Choć pierwotnie pojęcie stosowane było przez biologów w systematyce roślin i zwierząt, to później zostało zaadaptowane do antropologii, geografii i ekonomii.









# 3

Środowisko naturalne  
Pustynie gorące

## 3 ŚRODOWISKO NATURALNE

---

### 3.1 WPROWADZENIE | NATURA

Naturę określić można jako otaczający człowieka świat nieantropogeniczny. Świat podlegający nieustannym przemianom w wyniku działania zjawisk i procesów biologicznych, chemicznych i fizycznych oraz ciągłego krążenia materii i energii w naturze. Natura to świat nieskażony wpływami ludzkiej działalności. Jest to zatem stan pierwotny przyrody, niezmieniony przez kulturę i cywilizację, stanowiący zbiór elementów naturalnych – przyrody ożywionej (biocenozy), ale również martwej i nieożywionej (biotopu) (26). Wszystkie jej elementy składowe wspólnie tworzą bardziej złożone systemy – ekosystemy naturalne, biomy, a wreszcie biosferę (119).

### 3.2 NATURA | MODEL, MIARA, MENTOR

Warunkiem właściwego naśladowania natury jest zmiana sposobu jej postrzegania. Zmiana ta wymaga tego, aby człowiek zaakceptował fakt, że on sam stanowi integralną część przyrody i przestał funkcjonować tak, jakby był od niej oddzielony. Postuluje się, aby człowiek zmienił podejście z przedmiotowego traktowania natury jako źródła dóbr, a zaczął zwracać uwagę na bogactwo jakim natura dysponuje (9), (33), (34). Bogactwo przyrody stanowi bowiem skarbnicę wartościowej i oryginalnej wiedzy.

#### 3.2.1 NATURA JAKO MODEL

Traktowanie natury jako modelu odnosi się do odkrywania i naśladowania naturalnych wzorców występujących w przyrodzie w celu rozwiązywania problemów cywilizacyjnych poprzez tworzenie zrównoważonych rozwiązań, które nie oddziałują negatywnie na biosferę. W trwających 3,8 miliarda lat ciągłych procesach doboru naturalnego i ewolucji wyodrębnione zostały strategie i mechanizmy, które umożliwiły przetrwanie organizmów w ich naturalnym środowisku (9). Wspomniane strategie i mechanizmy zostały wykształcone w formie licznych adaptacji morfologicznych, fizjologicznych oraz behawioralnych adekwatnych do poszczególnych środowisk. Stanowią one niedoścignione modele efektywności osiąganey poprzez optymalne, bezodpadowe gospodarowanie zasobami i tworzenie spójnych systemów funkcjonujących we wzajemnej harmonii. Badanie oraz umiejętne naśladowanie naturalnych mechanizmów adaptacyjnych może zatem posłużyć do rozwiązania aktualnych problemów z jakimi mierzy się ludzkość.

#### 3.2.2 NATURA JAKO MIARA

Powołując się na założenia biomimikry (patrz: Rozdz. 2) natura może być traktowana jako jakościowa i ilościowa miara antropogenicznych działań. Oznacza to ocenianie „prawidłowości” tworzonych przez człowieka rozwiązań pod względem ich adekwatności i przydatności w kontekście prawidłowego funkcjonowania ekosystemów ziemskich, zarówno w skali lokalnej jak i całej planety (9). Ocena ta jest możliwa dzięki przeanalizowaniu, w jakim stopniu w projektach antropogenicznych uwzględnione zostały „Zasady Życia” (*ang. Life’s Principles*), czyli zaczerpnięte z natury standardy projektowe. Analiza ta daje nie tylko możliwość oceny stanu obecnego – miary realizacji założonego celu – ale także zidentyfikowania obszarów wymagających dalszej poprawy,

co za tym następuje, zmiany kryteriów projektowych. Przyjęcie tych założeń pozwala więc na stawianie następujących dodatkowych pytań w odniesieniu do tworzonych rozwiązań antropogenicznych, wzorowanych na naturze: (i) *Czy promuje ono życie?*; (ii) *Czy pasuje ono do otoczenia?*; (iii) *Czy będzie ono trwałe?*

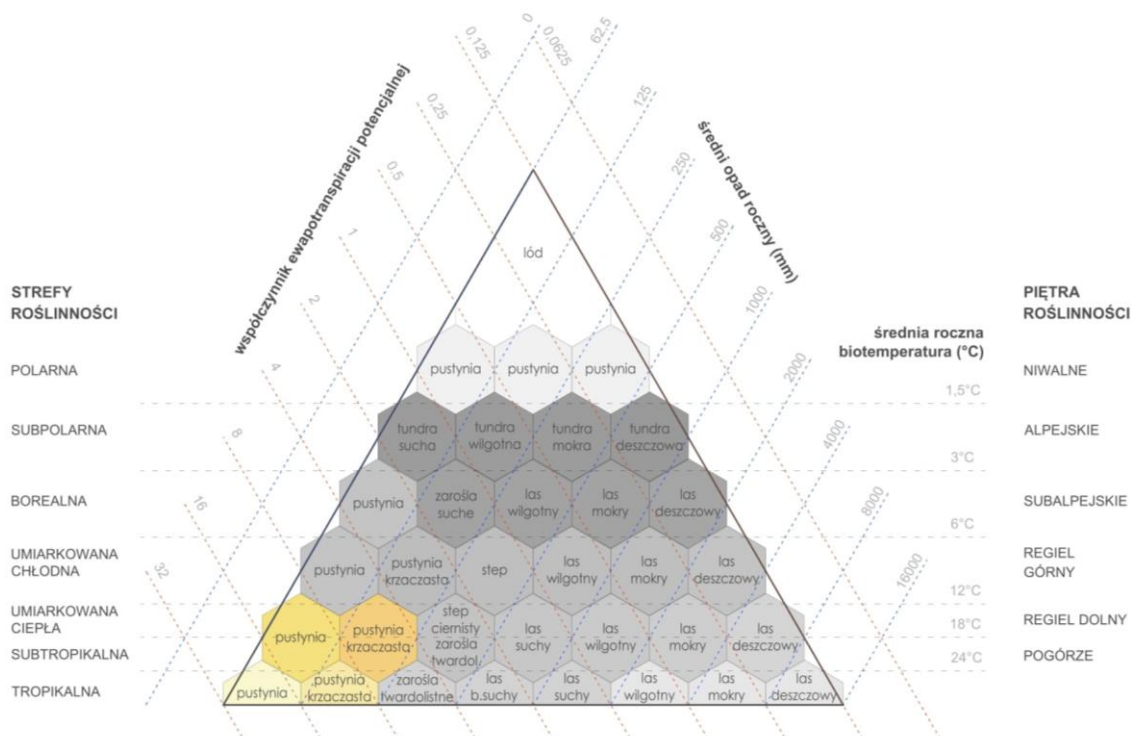
### 3.2.3 NATURA JAKO MENTOR

Odnoszenie się do natury jako źródła wiedzy oznacza traktowanie przyrody jako nauczyciela, od którego możemy się uczyć. Zmiana podejścia do środowiska naturalnego, postawienie się w odmiennej niż dotychczas pozycji, oznacza dla obserwatora natury otwarcie nowych perspektyw i możliwości. Personifikując naturę, można powiedzieć, że zmiana ta pozwala na traktowanie natury jako „nauczyciela i mentora”, wyposażonego w bagaż doświadczeń, prób i błędów, wynikających z trwającej przez 3,8 miliarda lat ewolucji. Przez ten czas dobór naturalny spowodował wyłonienie się rozwiązań, które funkcjonują, są adekwatne i trwałe. Rozwiązania te charakteryzują: (i) elastyczność (rozumiana jako umiejętność dostosowania się do zmian), (ii) różnorodność, dzięki którym organizmy są w stanie nieustannie adaptować się do ciągle zmieniających się warunków.

## 3.3 GENIUSZ NATURY | BIOM

Liczne świadectwa skutecznego oddziaływania procesów ewolucji oraz doboru naturalnego można odnaleźć w biomach, czyli zbiorowiskach organizmów roślinnych i zwierzęcych zamieszkujących rozległe, zróżnicowane ekologicznie obszary, które występują na Ziemi. Często obszary te są znacznie od siebie oddalone. Charakteryzują je zbliżone czynniki abiotyczne (nieożywione) takie jak klimat, czy gleby oraz biotyczne – organizmy żywe, fauna i flora, które posiadają podobne cechy przystosowawcze umożliwiające im przeżycie w danym środowisku (119). Zasięg biomu definiuje szczególnie występowanie specyficznej dla danego obszaru szaty roślinnej lub rzadziej gatunków zwierząt, głównie dużych ssaków. Skład gatunkowy biomu w znacznej mierze determinowany jest przez warunki klimatyczne: przede wszystkim zakres temperatur i opady. Znaczący wpływ wywierają również naturalnie występujące zjawiska, takie jak powodzie, pożary, czy susze, a także zmiany klimatyczne.

W najbardziej ogólnym ujęciu biomy dzielone są na wodne, zajmujące około 73% powierzchni Ziemi i lądowe. W celu dalszej klasyfikacji bioróżnorodności stworzonych zostało wiele systemów, które różnią się między sobą sposobem podziału warunków ekologicznych i klimatycznych (120). Rysunek 3-1 prezentuje jeden z nich.

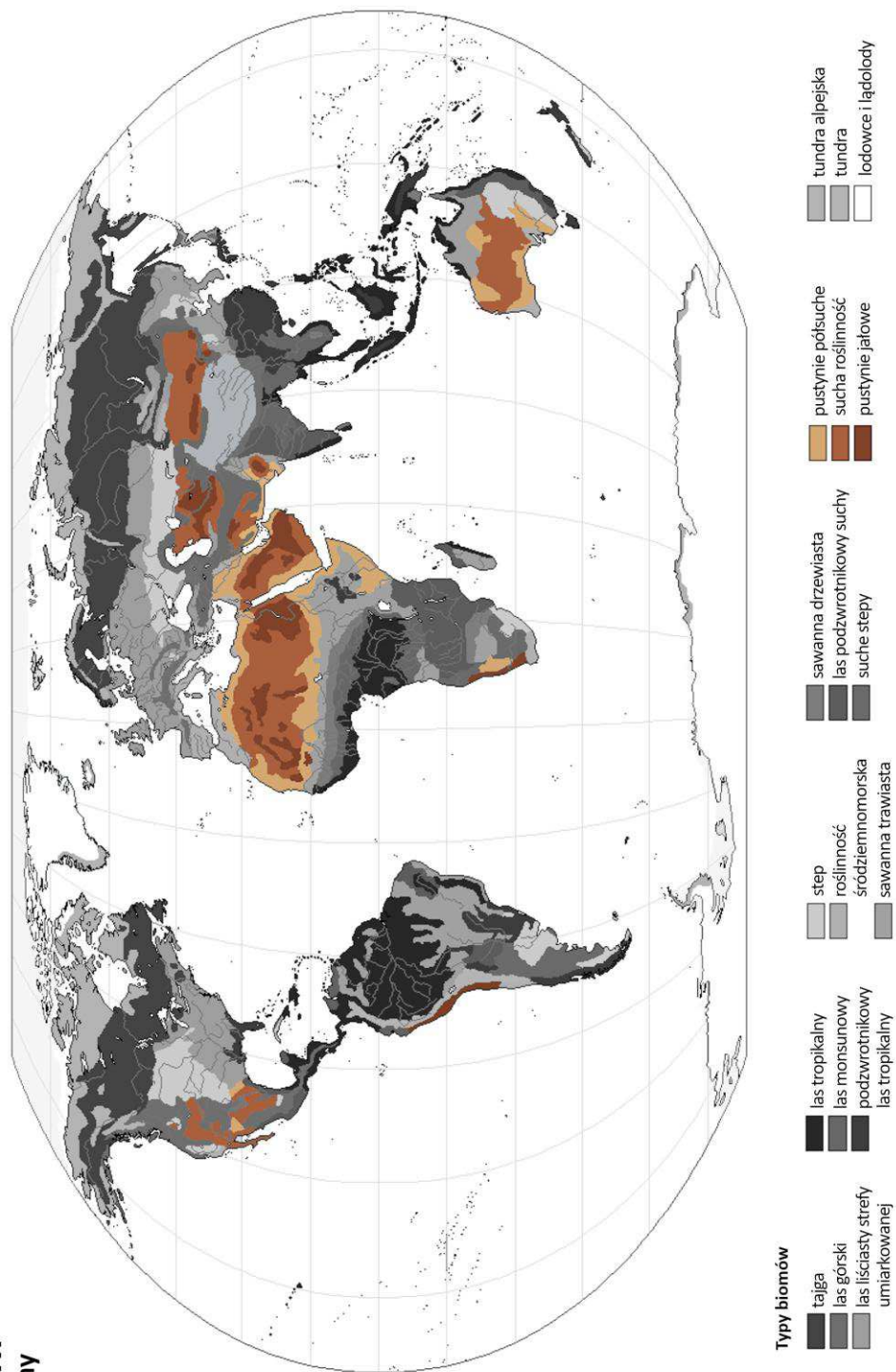


Rys. 3-1 Schemat bioklimatyczny służący do klasyfikacji obszarów lądowych wg systemu Holdridge'a. Oprac. własne na podstawie: Peter Halasz, 2007.

Procesy doboru naturalnego spowodowały, że wykształcone zostały mechanizmy, a tym samym wzorce i zasady wspólne dla organizmów i ekosystemów występujących w obrębie poszczególnych biomów (34). To właśnie te struktury i procesy, stanowią przedmiot badań nowej dyscypliny wiedzy, jaką jest biomimikra. Celem tych badań jest zrozumienie zasad działania wspomnianych mechanizmów, a następnie wzorowanie się na nich, również w procesie projektowania architektonicznego.

Pierwszy krok do zrozumienia sposobu funkcjonowania tych mechanizmów stanowi poznanie charakterystyki danego biomu (121). W tym celu wartościowe narzędzie pracy stanowi mapa biomów. Mapa prezentowana na rysunku 3-2 oparta jest na systemie klasyfikacji stworzonym przez Światowy Fundusz na rzecz Przyrody (WWF). W ramach niego wyodrębnionych zostało 18 biomów lądowych, w tym wyróżnione na brązowo przez autorkę obszary pustynne, obejmujące pustynie jałowe, suchą roślinność oraz pustynie półsuche.

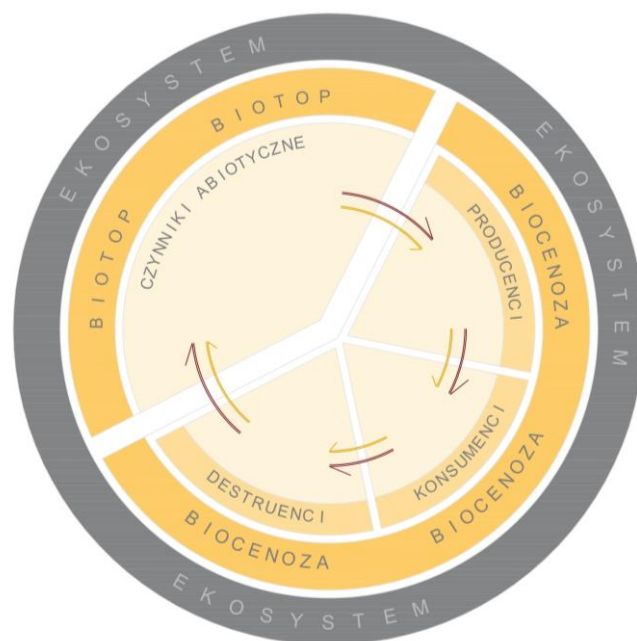
**ŚWIAT**  
biomy



Rys. 3-2 Mapa biomów z wyróżnieniem występowania biomów pustynnych na świecie.  
Oprac. własne na podstawie: <https://www.alternatehistory.com/forum/attachments/biome-map-png.241781/>.

### 3.3.1 EKOSYSTEM – BIOTOP I BIOCENOZA

W celu poznania danego biomu należy przyjrzeć się jego strukturze, w której skład wchodzi często liczne ekosystemy. Ekosystem stanowi układ ekologiczny tworzony wspólnie przez biocenozę połączoną zamkniętą siecią pokarmową (troficzną) i biotop, w którym dochodzi do pełnego obiegu materii oraz przepływu energii (119). Tym samym biotop (środowisko abiotyczne – pozbawione elementów ożywionych) zdefiniować można jako ustabilizowany i trwały habitat, siedlisko, bądź środowisko życia powiązanego z nim zespołu populacji organizmów żywych, biocenozy, funkcjonujących wspólnie w określonej skali (122).



Rys. 3-3 Schemat przedstawiający strukturę ekosystemu wraz z zachodzącymi w nim procesami obiegu materii i energii. Opracowanie własne.

W ramach naturalnej adaptacji do nieustannie zmieniających się warunków zewnętrznych ekosystemy ulegają stopniowym przeobrażeniom. Następuje to poprzez tzw. sukcesję ekologiczną<sup>10</sup>. Jednym z czynników wpływających na sposób funkcjonowania ekosystemów są zmiany klimatyczne (123), (124), które zaburzają utrzymujące się przez wiele lat na danym obszarze naturalne warunki pogodowe. Zmiany te, a także inne czynniki lokalne – takie jak ukształtowanie terenu, położenie względem słońca i przeważających wiatrów, czy różnice w wysokości nad poziomem morza – sprawiają, że mikroklimat dwóch obszarów sąsiadujących ze sobą może się od siebie różnić (125). Dlatego przy tworzeniu jakichkolwiek rozwiązań należy pamiętać o dokładnej analizie kontekstu, by ingerencję w naturalny ekosystem ograniczyć do minimum. W przypadku projektowania architektonicznego warto zatem wziąć pod uwagę

<sup>10</sup> *Sukcesja ekologiczna* – proces kierunkowy, polegający na przekształcaniu składu gatunkowego oraz struktury biocenozy. Dzieleny na sukcesję pierwotną w przypadku zasiedlania obszarów jałowych bądź wtórną zachodzącą na obszarze wcześniej skolonizowanym, jednak znacznie zmienionym na przykład w wyniku pożaru. Sukcesja zachodzi do momentu osiągnięcia stabilnego stadium rozwojowego biocenozy, tzw. klimaksu (119).

lokalizację budynku, jak też naturalnie występujące uwarunkowania, a następnie właściwie się do nich odnieść.

### 3.3.2 KLIMAT

Jak już wcześniej wspomniano klimat stanowi jeden z czynników abiotycznych wpływających na kształtowanie biomów. Zatem zrozumienie sposobu funkcjonowania biomów, a tym samym ograniczenie ingerencji w występujące w nim ekosystemy naturalne będzie zależało również od rozpoznania warunków klimatycznych panujących na danym obszarze.

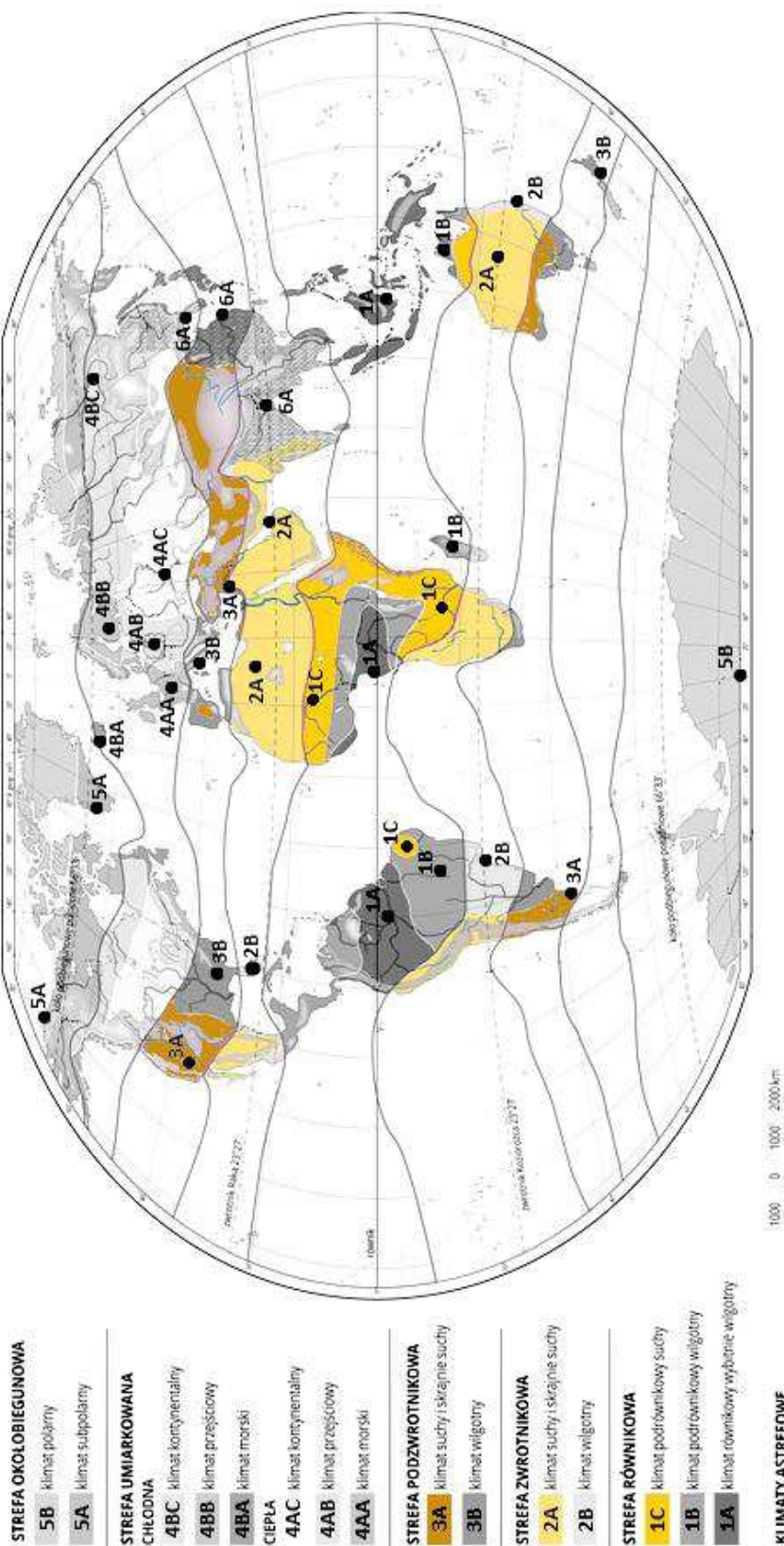
Od drugiej połowy XIX wieku powstało wiele systemów klasyfikacji klimatów opartych na różnorodnych założeniach, z których najbardziej rozpowszechniona jest klasyfikacja Köppena. Oparta jest ona na średnich miesięcznych temperaturach oraz wielkości i rozkładzie opadów rocznych zależnie od szerokości geograficznej. W klasyfikacji tej poszczególne typy klimatów korespondują z granicami biomów (stref wegetacyjnych) (126). Na kolejnych stronach przedstawiono dwa systemy klasyfikacji klimatów – Okołowicza (patrz: Rys. 3-4) oraz Köppena (patrz: Rys. 3-5), uwzględniające rozmieszczenie naturalnych zbiorowisk roślinnych. Kolorami żółtym i brązowym wyróżniono na nich obszary występowania stref gorących i suchych, które – jak można zauważyć – w znacznym stopniu pokrywają się z obszarami biomów pustynnych (patrz: Rys. 3-2). Porównując mapy (patrz: Rys. 3-2 oraz Rys. 3-4 i Rys. 3-5) widoczne jest, że strefy klimatyczne i biomy mniej więcej się ze sobą pokrywają.

Panujące na Ziemi klimaty charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem, od skrajnie suchego po polarny. W makroskali kształtowane są przede wszystkim przez energię słoneczną ogrzewającą masy lądowe i wodne, wilgotność, ruch oraz zanieczyszczenie pyłowe i gazowe powietrza, opady czy ciśnienie atmosferyczne. Natomiast w skali regionalnej lokalny bioklimat kształtują czynniki geograficzne, takie jak: topografia, geomorfologia, układ szaty roślinnej, stosunki wodne, czy chociażby sposób użytkowania danego terenu (119), (127), (128).

W kolejnych punktach rozdziału przeprowadzono analizę środowiska gorącego i skrajnie suchego, z uwzględnieniem panujących w nim warunków klimatycznych, występujących tam: rzeźby terenu i gleb oraz przykładów organizmów żywych. Badania te mają służyć jako kontekst do prowadzenia dalszych badań.

## ŚWIAT

### strefy klimatyczne i typy klimatu

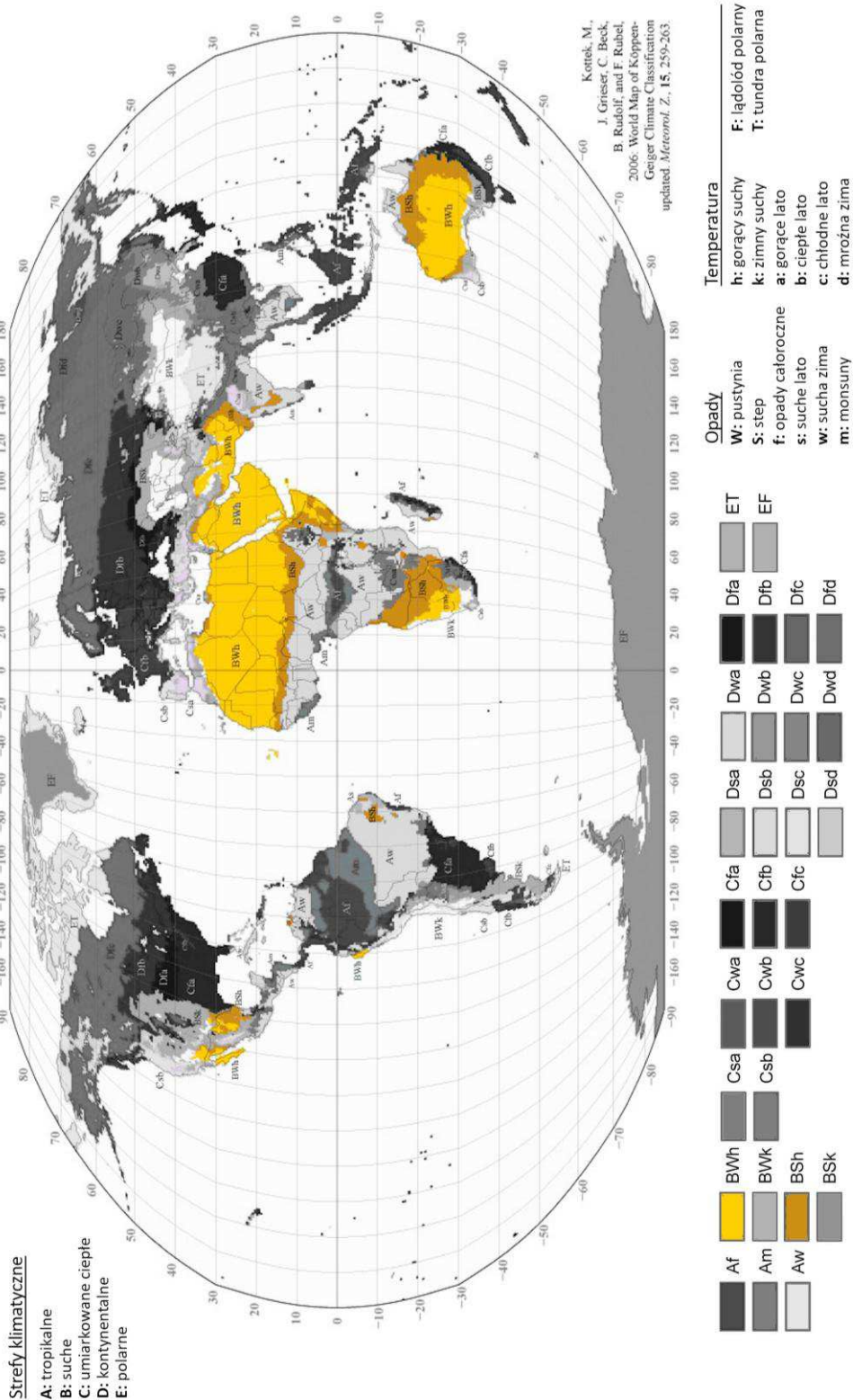


Rys. 3-4 Obszary stref klimatów suchych i skrajnie suchych wg najbardziej powszechnej w Polsce klasyfikacji W. Okołowicza, uwzględniającej wielkość i rozkład opadów atmosferycznych oraz zmian temperatury powietrza w roku. Uwzględnione zostały również rozmieszczenie naturalnych zbiorowisk roślinnych, rozkład prądów morskich oraz stopień zasolenia wód. Oprac. własne na podstawie <http://geografia24.pl/strefy-klimatyczne-na-ziemi/>.



# ŚWIAT

strefy klimatyczne i typy klimatów



Rys. 3-5 Obszary stref klimatów gorących suchych wg klasyfikacji W. Köppena. Oprac. własne na podstawie <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>.

### 3.3.3 FLORA I FAUNA PUSTYNNNA – ADAPTACJE

Organizmy żyjące w środowisku gorącym, suchym wykształciły szereg mechanizmów przystosowawczych pozwalających im na przeżycie w trudnych warunkach klimatycznych. Warto jednak zauważyć, że niektóre obszary pustynne są tak suche, że nie występuje na nich żadna roślinność. Uboga szata roślinna przyczynia się do tego, że tutejsze gleby są niemal pozbawione materii organicznej, natomiast obfitują w sole mineralne – chlorek sodu, węglan wapnia, siarczan wapnia – które często dodatkowo przyczyniają się do hamowania rozwoju roślinności (42), (89), (119). Jednak główne ograniczenia, do których musiały zaadaptować się tutejsze organizmy to wysokie temperatury oraz brak wody.

Z tych względów flora pustynna musiała wykształcić mechanizmy pozwalające jej zarówno na zbieranie i magazynowanie płynów, jak również ograniczenie transpiracji (parowania z komórek roślinnych). Dlatego wiele roślin pustynnych posiada zredukowane liście, często przekształcone w kolce lub sięga korzeniami aż do znajdujących się głęboko pod ziemią warstw wodonośnych (129). Niektóre rośliny, np. karnegia olbrzymia (*Carnegia gigantea*), pokryte są dodatkowo substancją woskową tzw. kutykulą, która zapobiega utracie wody. Istnieją również takie rośliny, które posiadają włoski, umożliwiające im odbijanie promieni słonecznych, a tym samym ochronę przed przegrzaniem. W tym samym celu część roślin, np. jak pochodząca z rodziny astrowatych *Encelia farinosa*, posiada liście w kolorze srebrnym. Ta refleksyjna powłoka umożliwia obniżenie temperatury powierzchni liści nawet o kilka stopni (30). Innym przystosowaniem roślinności pustynnej jest uzależnienie okresu wegetacyjnego od występowania pór deszczowych.

Podobnie jak flora, również i fauna pustynna dostosowała swój cykl życiowy do panujących tu warunków. Duża część występujących na obszarach pustynnych organizmów zwierzęcych prowadzi nocny tryb życia, spędzając znaczną część dnia pod powierzchnią ziemi lub w kryjówkach skalnych, tym samym ograniczając ekspozycję ciała na bezpośrednie działanie promieni słonecznych. Lokalne zwierzęta budują również schronienia dające możliwość utrzymania wewnątrz temperatury niższej niż otoczenia. Przykład mogą stanowić kopce termitów (*Isoptera*), dzięki którym owady te utrzymują wewnątrz stałą temperaturę na poziomie 30°C (130) lub gniazda tkaczy (*Philetarius socius*) wyposażone w komory o kontrolowanej temperaturze, około 33°C (129).

W przeciwieństwie do strategii wykorzystywanych przez organizmy nocne, zwierzęta dzienne polegają w znacznej mierze na zapobieganiu przegrzaniu i odprowadzaniu ciepła. Jest to możliwe dzięki zjawiskom konwekcji<sup>11</sup>, przewodzenia i promieniowania (30).

Jednym ze zwierząt wykorzystujących te zasady są słonie (*Loxodonta africana*). Poprzez wachlowanie uszami wymuszają one ruch powietrza, a tym samym zwiększone uwalnianie energii cieplnej (131). Cechą, która także umożliwiła słoniom przystosowanie się do życia na pustyni jest pomarszczona skóra. To właśnie dzięki niej, ogólny stosunek objętości ciała zwierzęcia jest znacznie mniejszy w porównaniu do jego powierzchni, co pozwala zapobiegać przegrzaniu organizmu. Ponadto zmarszczki powodują również zacienianie poszczególnych obszarów skóry, dodatkowo obniżając jej temperaturę. Jeszcze jedną zaletą tego dostosowania jest utrzymywanie wilgoci pomiędzy fałdami (132). Szeroki wachlarz tych adaptacji sprawia, że pomimo swoich

---

<sup>11</sup> Konwekcja jest mechanizmem transportu energii cieplnej związanej z makroskopowym ruchem materii w płynach (włączając powietrze). Wyróżniamy konwekcję (i) naturalną, opartą na przepływie wywołanym różnicą temperatur bądź ciśnienia oraz (ii) wymuszoną poprzez urządzenia mechaniczne (30).

rozmiarów, słoń jest gatunkiem doskonale dostosowanym do życia na obszarach gorących, suchych.

W swojej pracy Badarnah-Kadri, powołuje się na wyniki badań (133), które sugerują, że chłodzący efekt prądów konwekcyjnych uzyskiwany jest również przez zebry (*Equus quagga*). Ich czarno-białe ubarwienie przyczynia się do nierównomiernego nagrzewania skóry. W wyniku tego powstająca pomiędzy poszczególnymi pasami różnica temperatur, mogąca wynieść nawet 10°C, powoduje zwiększone parowanie. W celu zwiększenia procesu chłodzenia przez parowanie zwierzęta opierają się również na takich strategiach jak pocenie, dyszenie lub lizanie się (134). Równie interesującym rozwiązaniem, wykorzystywanym przez oryksa (*Oryx leucoryx*) i gazelę Thomsona (*Gazella thomsoni*), jest regulowanie temperatury mózgu za pomocą przepływu krwi przy użyciu zastawek (135). Mechanizm ten opiera się na kontrolowanym przepływie schłodzonej przez gruczoły śluzowe nosa krwi żyłnej, która w razie potrzeby dociera do zatok jamistych obniżając temperaturę znajdujące się w nich krwi tętniczej. Schłodzona krew poprzez sieć naczyń krwionośnych dociera następnie do mózgu i serca, dając możliwość przetrwania tym zwierzętom w momencie gwałtownej ucieczki przed drapieżnikami (129).

Istotny wpływ na szansę przetrwania organizmów ma również ich morfologia. Zwierzęta pustynne charakteryzują przeważnie niewielkie rozmiary. Zwykle posiadają też jasne ubarwienie, będące zarówno kamuflażem, jak i sposobem na zapobieganie nadmiernemu absorbowaniu ciepła. Tutejsza fauna często wyposażona jest w chitynowe pancerze lub rogowate łuski. Powłoki te chronią zwierzęta przed nadmierną utratą wody, a niekiedy umożliwiają również zbieranie wilgoci w trakcie porannej mgły. Dzięki zjawisku kondensacji krople wody osadzają się na pancerzach bądź tarczach, a następnie spływają kanalikami do otworów gębowych. Mechanizm ten wykorzystują m.in. chrząszcz namibijski (*Stenocara dentata*) (136) i moloch straszliwy (*Moloch horridus*) (137). Nieco inną strategię zbierania wody opracowała żaba – podeszczowik pustynny (*Breviceps macrops*). Gatunek ten, będąc zakopany, dzięki licznej sieci naczyń krwionośnych znajdujących się na brzuchu, jest w stanie wchłaniać wodę bezpośrednio z piasku.

Zaprezentowane powyżej struktury morfologiczne i mechanizmy funkcjonalne stanowią zaledwie niewielką część tych, które zostały wykształcone przez naturę w wyniku miliardów lat ewolucji. Rozwiązania te dały możliwość przetrwania organizmom w niesprzyjających życiu warunkach środowiska gorącego, skrajnie suchego, bez naruszania jego naturalnej równowagi. Pokazuje to, że po uważnym przeanalizowaniu rezultaty działania doboru naturalnego, mogą stanowić niezastąpione źródło inspiracji dla tworzenia zrównoważonych rozwiązań technologicznych.

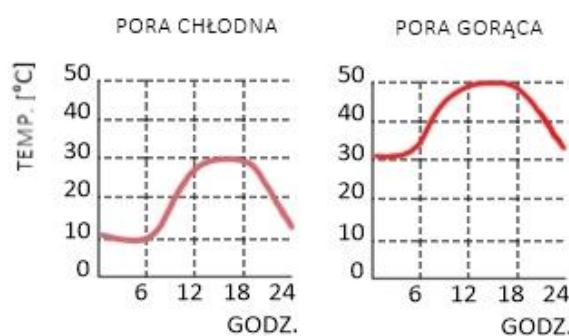
### 3.4 KONTEKST | PUSTYNIE GORĄCE

Spośród wszystkich biomeów pustynie jako obszary suche charakteryzuje najbardziej uboga szata roślinna. Na świecie wyróżniamy pustynie chłodne (Gobi, Pustynia Wielkiej Kotliny, bądź Błędowska w strefie umiarkowanej) oraz gorące (Sahara, Lut, Mojave, czy Sonora w strefach subtropikalnej i tropikalnej) (119). Z racji, że niniejsza praca poświęcona jest badaniu stref gorących, suchych szczególna uwaga zostanie poświęcona właśnie tym obszarom.

#### 3.4.1 WARUNKI KLIMATYCZNE

Strefa gorąca, sucha znajduje się w dwóch pasach na szerokościach geograficznych pomiędzy około 15° a 30° na północ i południe od równika (125). Cechami charakterystycznymi tych regionów są bardzo gorące lata i ciepłe zimy, a także wysokie dobowe amplitudy temperatur. W okresie gorącym temperatura powietrza gwałtownie wzrasta po wschodzie słońca i średnio osiąga temperaturę powyżej 40°C. Do tej pory najwyższa oficjalnie zmierzona w tych regionach temperatura powietrza sięgnęła 56,7°C – Dolina Śmierci, USA, 1913 (138). Warto jednak podkreślić, że analiza danych satelitarnych zebranych przez NASA w latach 2002-2019, wykazała, że mierzona regularnie temperatura gruntu na pustyni Lut w Iranie była nawet wyższa i wyniosła odpowiednio 70,7°C (2005) oraz 80,7°C (2018) (138). Nocą temperatura powietrza spada zwykle do około 20°C. Przy gruncie natomiast może obniżyć się poniżej 0°C z możliwością wystąpienia przygruntowych przymrozków. W zależności od kontynentalizmu<sup>12</sup> i szerokości geograficznej, dużo trudniejsze warunki pod względem amplitud dobowych mogą panować w chłodnej porze roku, gdy za dnia temperatura wzrasta do ponad 30°C, w nocy zaś spada nawet o 20°C lub więcej (patrz: Rys. 3-6). Jeszcze większe wahania temperatury pojawiają się tuż przy gruncie, gdzie amplituda dobowa może wynieść ponad 85°C.

W regionach przybrzeżnych klimat łagodzony jest przez chłodne prądy oceaniczne oraz częste występowanie mgieł (42). W okresie gorącym średnie maksymalne temperatury dniowe wciąż dochodzą do około 40°C, a następnie maleją o mniej więcej 10-15°C. W porze chłodnej spadek temperatur nocą jest podobny, natomiast za dnia temperatura sięga średnio około 25°C.

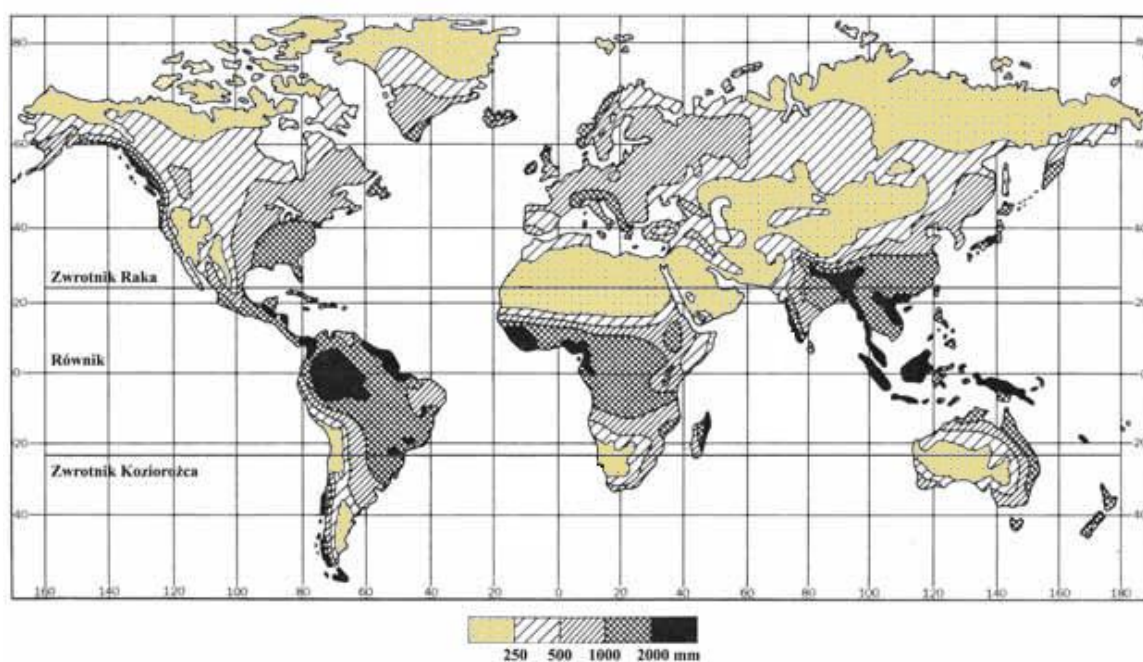


Rys. 3-6 Przykładowy wykres rozkładu temperatur dobowych w regionach gorących i suchych.

Oprac. własne na podstawie P. Gut i D. Ackerknecht, 1993 (125).

<sup>12</sup> *Kontynentalizm* – jedna z podstawowych cech klimatu opisująca wpływ masy lądowej na klimat danego regionu. Stopień kontynentalizmu określa się przy użyciu wskaźników np. Gorczyńskiego (1918), Ewerta (1963), opisujących wzajemne oddziaływanie kontynentów i ocean. Stopień ten zmienia się przestrzennie, wzrastając w głąb lądu (283).

Względna wilgotność powietrza w regionach pustynnych jest bardzo niska, zwykle wynosząc 15-30% w obszarach śródlądowych, a na Pustyni Saharyjskiej nawet 5% (42), co stanowi główną przyczynę powstawania olbrzymich różnic temperatur dobowych. W przypadku obszarów przybrzeżnych ilość wilgoci w powietrzu może wzrosnąć nawet do 90% (125), co w połączeniu z wysokimi temperaturami wpływa na duże poczucie dyskomfortu (bardzo ciepło i wilgotno). W zależności od regionu klimat pustynny charakteryzuje się dużą zmiennością sum opadów, rozkładu i intensywności. Ilość opadów jest dość mocno zróżnicowana, od obszarów skrajnie suchych, gdzie opady potrafią się nie pojawiać przez kilka kolejnych lat, po obszary określane jako „jałowe”, otrzymujące od 25 do 200 mm opadów rocznie (patrz: Rys. 3-7) (42). Bezchmurne niebo, wysokie temperatury, a także wiatry doprowadzają do przewagi parowania nad opadami, które choć rzadkie i nierównomierne, mogą niekiedy spowodować znaczne podtopienia.



Rys. 3-7 Rozkład rocznej sumy opadów atmosferycznych na Ziemi. Oprac. własne na podstawie: [http://lorenz.home.pl/matura\\_nowa/matura2006/komentarze08/Kom\\_CKE\\_geo\\_2008.pdf](http://lorenz.home.pl/matura_nowa/matura2006/komentarze08/Kom_CKE_geo_2008.pdf).

W strefach ekstremalnie gorących i suchych brak zachmurzenia występuje przez ponad 70% czasu (42), jedynie w obszarach przybrzeżnych pojawiają się okresowe zamglenia. Czyste niebo wpływa na to, że promieniowanie słoneczne dociera do niższych warstw troposfery<sup>13</sup>, powodując nagrzewanie się wszystkich powierzchni. Z uwagi na brak elementu filtrującego w postaci chmur bądź pary wodnej, które odbijają lub pochłaniają promienie słoneczne, promieniowanie krótkofalowe jest niezwykle intensywne i cechuje się dużą energią. Wpływ na temperaturę wywiera także promieniowanie długofalowe, które pochodzi z otaczającej atmosfery bądź odbijane jest od powierzchni ziemi. Wieczorem, gdy temperatura powietrza obniża się, znaczna ilość zmagazynowanego w ciągu dnia ciepła jest stopniowo uwalniana w postaci promieniowania w kierunku nocnego nieba (139).

Zarówno różnice temperatur, powodujące zmiany ciśnienia atmosferycznego, jak i wilgotność przyczyniają się do powstawania wiatrów, na które istotny wpływ mają również ukształtowanie

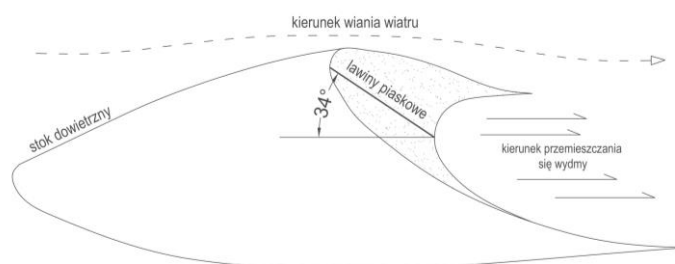
<sup>13</sup> Troposfera – najbliższa powierzchni planety warstwa budująca atmosferę ziemską, w której zachodzą najważniejsze procesy kształtujące pogodę i klimat (119).

terenu oraz liczne przeszkody naturalne i antropogeniczne. W regionach pustynnych w ciągu dnia pojawiają się zwykle silne i porywiste wiatry dodatkowo osuszające powietrze, z tendencją do przekształcania się w burze piaskowo-pyłowe przeważające w okresie chłodnym. Inaczej odbywa się to w obszarach sąsiadujących z większymi zbiornikami wodnymi, gdzie występuje stały układ wiatrów za dnia wiejących od morza w kierunku lądu, w nocy zaś odwrotnie.

### 3.4.2 RZEŻBA TERENU I GLEBY

Obszary pustynne i półpustynne należą do miejsc, w których występuje największe natężenie procesów eolicznych (wiatrowych). W ich skład wchodzi: (i) deflacja – wywiewanie zwietrzałego materiału skalnego przez wiatr, (ii) akumulacja wiatrowa tzw. eoliczna, której podstawową formą są wydmy, (iii) działalność „korazyjna”, czyli żłobienie czy ścieranie powodowane przez niesiony przez wiatr piasek, w wyniku której powstają takie formy jak graniaki, czy grzyby skalne. Wszystkie te procesy wpływają istotnie na rzeźbę terenu. Ważną rolę w kształtowaniu rzeźby pustyni wciąż odgrywają wody opadowe, a także rzeki stałe i okresowe, przyczyniające się do powstawania procesów takich jak: spłukiwanie bruzdowe i wązowowe oraz zmyw pokrywowy, który powoduje pogłębianie się starych dolin (wadi). Wiele czynników powoduje, że znaczną część obszarów pustynnych charakteryzuje niestabilne podłoże, które wymaga dodatkowych interwencji technicznych, aby mogło być zabudowane (89).

Zależnie od rodzaju podłoża obszary pustynne można podzielić na: (i) zajmującą największe obszary pustynię skalistą, charakteryzującą się zróżnicowaną rzeźbą terenu, (ii) pustynię piaszczystą, stanowiącą tak naprawdę niewielką część Sahary oraz (iii) pustynię żwirową/ilastą. Ta ostatnia stanowi pozostałość po wyschnięciu słonych jezior. Jej powierzchnię pokrywa silnie zasolony stwardniały, spękany muł z licznymi wykwitami węgla wapnia, gipsu i soli kamiennej. Poza piaskami lotnymi, z których formowane są wydmy, strukturę pustyni piaszczystej tworzą również pokryte solną bądź wapienną skorupą piaski „utrwalone” (140). Ich wzajemnie oddziaływania dostrzec można w charakterystycznej dla tego typu pustyni wydmie sierpowatej (barchan – patrz: Rys. 3-8), w której budowie stok dowietrzny jest łagodny i zbity, natomiast stok odwietrzny stromy i luźny.



Rys. 3-8 Schemat budowy wydmy sierpowatej (barchanu).  
Opracowanie własne.

Całkowicie pozbawione materii organicznej gleby pustyni praktycznie nie magazynują wilgoci, natomiast w dużym stopniu pochłaniają promieniowanie słoneczne, przez które mocno się nagrzewają. Ich wysokie zasolenie, bądź tworzące się na nich zestalone solne skorupy, są wynikiem podsiąkania i szybkiego wyparowywania bogatej w sole mineralne wody. W rejonach, w których pojawia się pokrywa roślinna zauważalny jest znaczny spadek temperatury podłoża, co łagodząco wpływa na otoczenie, poprzez regulowanie temperatury i wilgotności powietrza.









# 4

Środowisko zbudowane  
Architektura wernakularna

## 4 ŚRODOWISKO ZBUDOWANE

---

### 4.1 WPROWADZENIE | CZŁOWIEK

Ludzie, rodzaj ssaków naczelnych z rodziny człowiekowatych (*Hominidae*), w trwającym wieki procesie ewolucji zdołali wykształcić liczne adaptacje, które pozwoliły im na przystosowanie się do życia w nieustannie zmieniającym się środowisku. Poza adaptacjami fizjologicznymi, człowiek – w celu utrzymania zrównoważonego stanu komfortu termicznego – nabył również nowe umiejętności, takie jak budowanie adekwatnych do panujących warunków schronień (35). Przez lata zdołał wykształcić skuteczne technologie i rozwiązania, które umożliwiały mu stworzenie odpowiednich do życia warunków (141). Te pierwotne metody nie wymagały stosowania dodatkowych urządzeń zasilanych sztucznymi źródłami energii, które wówczas nie były jeszcze dostępne. Obecnie – poprzez stosowanie zasad wywodzących się z tradycyjnych rozwiązań – można nie tylko zredukować koszty inwestycji oraz zużywaną energię, ale również minimalizować negatywne oddziaływanie budynku na środowisko (125).

Architekturę tradycyjną zwaną również wernakularną można zatem zdefiniować jako prostą, wykorzystującą tradycyjne konstrukcje wykonane z lokalnie dostępnych materiałów oraz opartą na sprawdzonych, wykształconych przez lata formach i rozwiązaniach (142). Wyraźne nawiązanie do zasad jej funkcjonowania dostrzec można w nurcie architektury bioklimatycznej, której istotę stanowi odnoszenie się do kontekstu, czynników budujących mikroklimat danego miejsca poprzez uwzględnianie lokalnych uwarunkowań i środowiska zbudowanego (143), (144), (145), (146). Efekt, jakim jest zdrowa i przyjazna dla użytkowników przestrzeń, uzyskany jest w znacznej mierze dzięki stosowaniu rozwiązań pasywnych oraz właściwemu doborowi materiałów i technologii, które pozwalają na kontrolowanie procesu wymiany ciepła pomiędzy środowiskiem zewnętrznym a wewnętrznym (147).

### 4.2 KOMFORT TERMICZNY | STOPIEŃ ZADOWOLENIA CZŁOWIEKA

Jak podają za Śliwowskim (148) Kubacka i Heim (149) komfort cieplny warunkuje samopoczucie człowieka oraz istotnie wpływa na zdolność wykonywania przez niego czynności życiowych. Ponadto oddziałuje również na jego zdrowie oraz podatność na choroby (150). Naukowcy podkreślają, że ze względu na szeroki zakres preferencji ciepłych ludzi oraz odmienne uwarunkowania stref klimatycznych niemożliwym jest stworzenie uniwersalnej definicji komfortu termicznego (16), (151). Zgodnie ze standardem ASHRAE 55 (152) komfort cieplny definiowany jest jako stan umysłu wyrażający zadowolenie ze środowiska termicznego, w którym przebywa człowiek (56). Opisuje się go również jako stan równowagi cieplnej organizmu – zrównoważonego bilansu cieplnego ciała człowieka z otoczeniem, bez odczuwania lokalnego dyskomfortu (153). Inna z definicji określa natomiast stan komfortu termicznego jako sytuację, w której człowiek powinien wykonać jak najmniejszy dodatkowy wysiłek by utrzymać równowagę cieplną organizmu (125). Chociaż uzyskanie komfortu termicznego jest niezwykle trudnym i złożonym zagadnieniem, to jednak zbliżenie się do stanu jak najbliższego optimum stanowi główne wyzwanie dla inżynierów i projektantów. W przypadku środowiska gorącego, suchego oznacza to przede

wszystkim niedopuszczanie do wzrostu temperatury wewnętrznej przez wyeliminowanie, bądź ograniczenie, przegrzania budynku (154).

Strefa komfortu determinowana jest zarówno przez czynniki psychologiczne, fizjologiczne, jak też abiotyczne. Do tych ostatnich zaliczają się: (i) temperatura powietrza (*ang. air temperature*) i średnia temperatura promieniowania otoczenia (*ang. mean radiant temperature*), które nie powinny się od siebie znacząco różnić, (ii) prędkość przepływu powietrza (*ang. air velocity*), wpływająca na zmianę warunków wymiany ciepła przez konwekcję, (iii) względna wilgotność powietrza (*ang. relative humidity*), powodująca zmiany w odprowadzaniu ciepła z organizmu na drodze parowania (155). W strefach gorących, suchych to właśnie średnia temperatura promieniowania uważana jest za główny czynnik wpływający na równowagę energetyczną człowieka (16). Temperatura ta wyraża wielkość wymiany ciepłej poprzez promieniowanie pomiędzy ciałem ludzkim a otoczeniem. Zatem określić ją można jako średnią temperaturę ważoną powierzchni wszystkich ciał otaczających człowieka. Poczucie komfortu termicznego jest kwestią subiektywną i w znacznej mierze zależy także od izolacyjności cieplnej odzieży, aktywności fizycznej, metabolizmu, ilości tkanki tłuszczowej, diety, wieku, płci czy stanu zdrowia. Pod tym względem położenie geograficzne odgrywa równie istotną rolę z powodu lokalnych uwarunkowań i zdolności aklimatyzacyjnych poszczególnych osób (125).

W ostatnich latach stworzono wiele modeli do określania komfortu termicznego wewnątrz budynków. Jak podkreślają Kubacka i Heim (149) najczęściej stosowany w tym celu jest model Fangera wykorzystujący zasady teorii bilansu cieplnego (156). Model ten oparto na dwóch wskaźnikach: PMV (*Predicted Mean Vote*) i PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*). Wskaźnik PMV jest funkcją zmiennych środowiskowych (np. temperatury powietrza) oraz fizjologicznych (np. poziomu aktywności fizycznej). Opisuje on średnią przewidywaną ocenę – wrażenie termiczne – dokonaną przez osoby przebywające w danym pomieszczeniu (150). Uzupełniający go wskaźnik PPD wyraża w procentach liczbę osób niezadowolonych z warunków panujących wewnątrz budynku. Jak podają autorzy artykułów (149), (150) w modelu Fangera warunki uznaje się za komfortowe w momencie gdy wartość wskaźnika PMV mieści się w granicach  $-0,5 < PMV < +0,5$ , co w przypadku wskaźnika PPD odpowiada wartości poniżej 10% osób niezadowolonych.

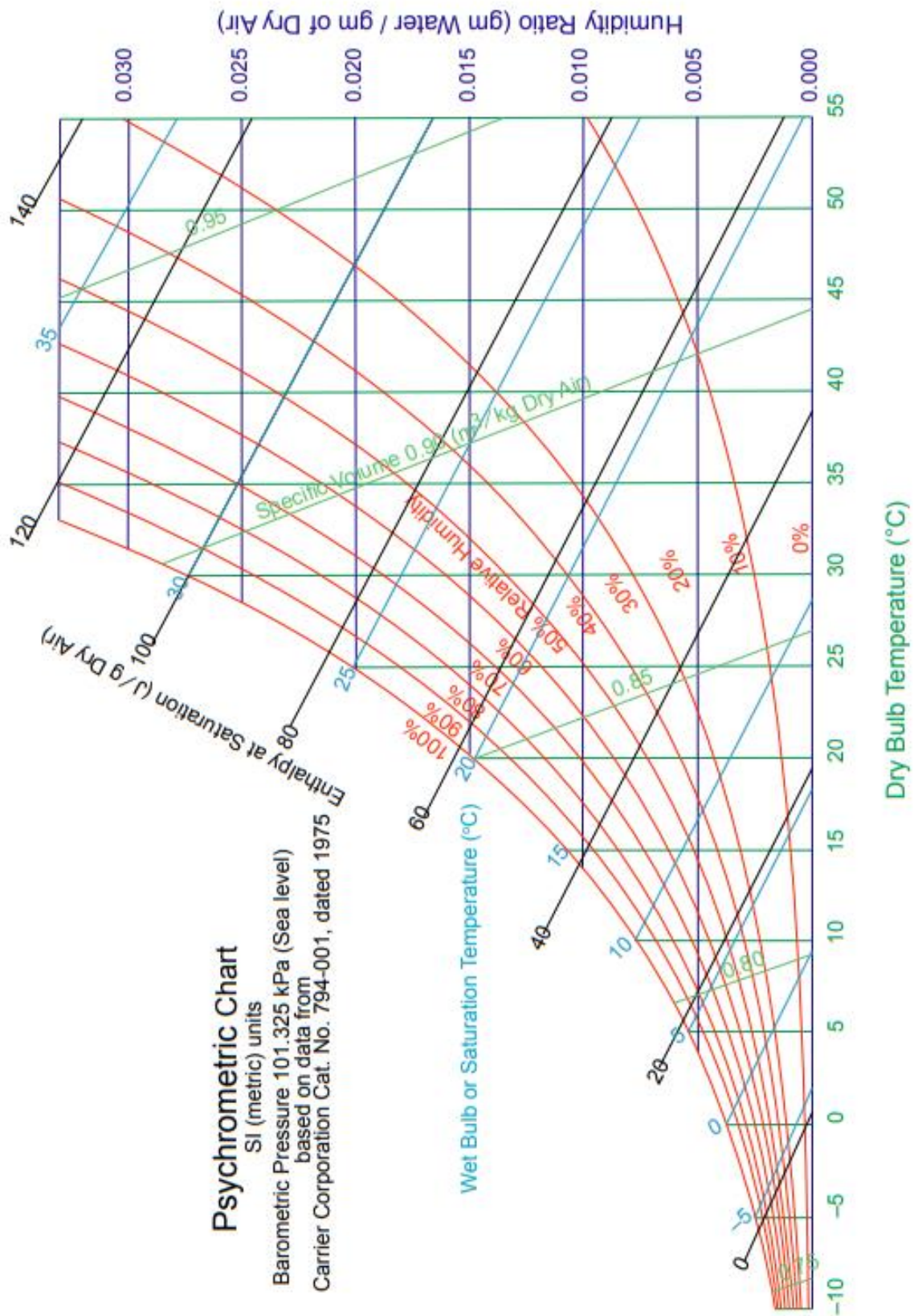
W swojej pracy Sedki (16) przytacza jednak opinie innych naukowców i stwierdza, że powyższy model oparty na bilansie cieplnym nie uwzględnia czynników socjologicznych i kulturowych. Wskazuje również, że przy posługiwaniu się wskaźnikiem PMV, zauważyć można tendencję do przeszacowywania znaczenia komfortu cieplnego. Jest ona szczególnie silna w przypadku badania komfortu w kontekście klimatu gorącego, suchego. Dlatego Sedki zwraca uwagę, że przy analizie komfortu termicznego równie istotne jest uwzględnianie modelu adaptacyjnego opartego na badaniach jakie przeprowadzili Nicol i Humphreys (157). Badacze zauważyli, że w budynkach przewietrzanych naturalnie ich użytkownicy są w stanie zaakceptować wyższe temperatury wewnętrzne, pod warunkiem, że mogą aktywnie na nie wpływać (np. regulować stopień otwarcia okna) (154). Z racji tego, model Nicol i Humphreys został stworzony głównie z myślą o budynkach wyposażonych w naturalny system wentylacji. W przeciwieństwie do Fangera, naukowcy uwzględnili, że na kształtowanie poczucia komfortu wpływają także możliwości adaptacyjne użytkowników (np. otwieranie okien, noszenie adekwatnego ubioru) oraz zewnętrzne parametry meteorologiczne i klimatyczne. Tym samym zakładali, że poziom osiąganego komfortu cieplnego będzie się zmieniał w zależności od uwarunkowań zewnętrznych.

Jak podkreśla Pieczara (154) oparcie się na modelu adaptacyjnym przywraca znaczenie roli projektantów w procesie kształtowania klimatu wewnątrz budynków. Jednocześnie wskazuje, że istotne w tym przypadku staje się tworzenie zespołów zintegrowanych składających się ze specjalistów różnych branż, którzy będą w stanie sprostać wyzwaniu projektowania budynków wentylowanych naturalnie lub hybrydowo. W nowym, proponowanym modelu adaptacyjnym uwaga projektantów zostaje z powrotem przekierowana na przemyślane, ale i odpowiedzialne tworzenie rozwiązań przestrzennych, konstrukcyjnych i funkcjonalnych oraz stosowanie materiałów adekwatnych do lokalnych uwarunkowań zewnętrznych w celu promowania naturalnej wentylacji. Dotychczasowy paradygmat ograniczał się do zapewnienia przez architektów wystarczającej przestrzeni dla mechanicznych, zasilanych elektrycznością urządzeń wentylacyjnych.

W celu właściwego kształtowania środowiska wewnątrz budynków, poza znajomością działania mechanizmów wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem, istotne jest także zrozumienie relacji zachodzących pomiędzy poszczególnymi czynnikami tworzącymi komfort termiczny, które dobrze prezentuje wykres psychrometryczny przedstawiony na rysunku 4-1. Diagram ten przedstawia przemiany powietrza wilgotnego w odniesieniu do parametrów *termodynamicznych* przy znormalizowanym ciśnieniu – zwykle przyjmowanym dla poziomu morza. Tym samym pokazuje zależności pomiędzy powietrzem, wilgotnością a temperaturą – czynnikami wpływającymi na budowanie komfortu termicznego. Typowymi parametrami przedstawianymi na diagramie są: (i) temperatura suchego termometru (*ang. dry-bulb temperature*), (ii) temperatura mokrego termometru (*ang. wet-bulb temperature*), (iii) współczynnik wilgotności (*ang. humidity ratio*), (iv) punkt rosy (*ang. dew point*), (v) entalpia (*ang. enthalpy*), (vi) objętość właściwa (*ang. specific volume*), (vii) wilgotność względna (*ang. relative humidity*)<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> Temperatura suchego termometru oznacza temperaturę powietrza wskazywaną przez dowolny standardowy termometr. W odróżnieniu do niej temperatura mokrego termometru odczytywana jest ze zwilżonego termometru poddanego działaniu wilgotnego strumienia powietrza. Określa ona najniższą temperaturę, do której przy danej wilgotności można ochłodzić ciało za pomocą parowania (41). Zatem przy założeniu 100% wilgotności powietrza temperatura mokrego ciała jest równa temperaturze powietrza, co wyraźnie ukazuje diagram psychrometryczny. Temperatura, w której powietrze nie może zatrzymać więcej wilgoci, czyli zostaje nasycone parą wodną, zwana jest punktem rosy. W punkcie tym dalsze odprowadzanie ciepła powoduje skraplanie się pary wodnej w postaci mgły (zjawisko występujące o poranku na pustyniach mgielnych – Namib i Atakama) lub, w przypadku temperatury niższej od punktu zamarzania, osadzanie się szronu. Z powyższego wykresu odczytać można zatem, że wraz ze wzrostem temperatury rośnie również zdolność do pochłaniania wilgoci przez powietrze. Stosunek ciśnienia pary wodnej znajdującej się w powietrzu do ciśnienia nasyconego wilgotnego powietrza (gazu w stanie równowagi z cieczą) opisuje wilgotność względna. Jeszcze jednym parametrem, który można odczytać z wykresu psychrometrycznego jest entalpia. Stanowi ona całkowitą ilość energii – ciepła powietrza i pochłoniętej pary wodnej – zawartą w danej objętości. Objętość właściwa określa natomiast ilość miejsca, jaką zajmuje mieszanina w postaci suchego powietrza i pary wodnej w jednej jednostce masy. Związany z nią oraz wcześniej wspomnianą wilgotnością względną jest współczynnik wilgotności. Informuje on o tym, jaka masa rozpuszczonej wody przypada na jednostkę objętości powietrza.



Rys. 4-1 Wykres psychrometryczny dla poziomu morza w jednostkach SI. Umożliwia on m.in. odczytanie wilgotności względnej powietrza na podstawie pomiarów temperatury suchego (dry-bulb) i mokrego (wet-bulb) termometru. Za uprzejmością: Arthur Ogawa, 2009.

### 4.3 ARCHITEKTURA PUSTYNNNA | ROZWIĄZANIA, TECHNIKI I MATERIAŁY

W samym klimacie gorącym i suchym ponad 50% całkowitej energii zużywanej w ramach eksploatacji współczesnych budynków wykorzystywane jest na ich mechaniczne chłodzenie w okresie najwyższych temperatur dobowych (158). Z uwagi na gwałtownie postępujący proces urbanizacji, a co za tym idzie, dogęszczanie tkanki miejskiej, problem ten będzie się jedynie wzmacniał, skutkując coraz większym zapotrzebowaniem na energię oraz emisjami powodującymi zanieczyszczenie powietrza (159). Jak wskazuje wielu badaczy (139), (141), (160), (161) architektura rodzima może stanowić wzór dla prób rozwiązań tego problemu. Naukowcy tak twierdzą, ponieważ oparta na tradycyjnych materiałach i technikach budowlanych architektura rodzima przez wieki zapewniała swoim użytkownikom komfortowe schronienie przed trudnymi warunkami środowiska zewnętrznego.

#### 4.3.1 SKALA MIASTA

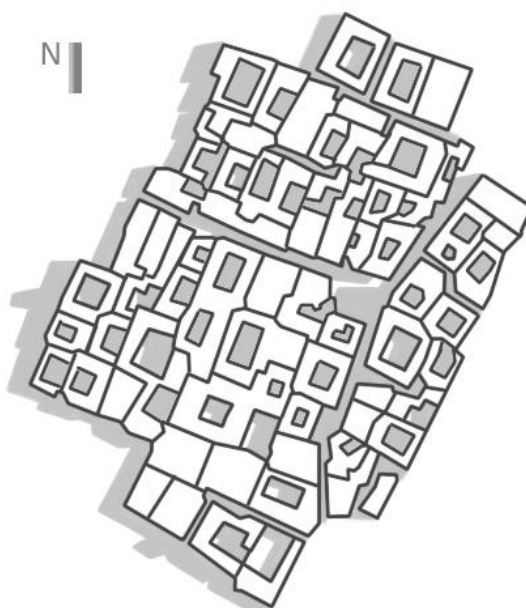
W regionach skrajnie gorących i suchych tradycyjny układ urbanistyczny miast był jedną z metod dostosowania się do panujących tam warunków. Chociaż forma urbanistyczna nie zmieni klimatu danego miejsca, to jednak zdecydowanie może wpłynąć na kształtowanie mikroklimatu miasta. Odpowiednia forma oraz właściwy sposób lokalizowania i orientowania budynków tym samym wpływają na poprawę komfortu użytkowników danej przestrzeni (125), (162), (163), (164) i redukują potrzebę zużycia energii na chłodzenie, bądź ogrzewanie budynków. Głównymi czynnikami wywierającymi presję są: temperatura powietrza i prędkość wiatru w poziomie ulic, kształtowane przez konwekcyjną wymianę ciepła między gruntem, budynkami i powietrzem przepływającym ponad nimi, a także ciepło emitowane przez tkankę miejską (165). W klimacie gorącym, suchym podstawowa strategia projektowa polega na jak największej redukcji zysków ciepła, przy jednoczesnym maksymalizowaniu jego strat. Jest to możliwe między innymi poprzez regulację pochłaniania oraz emisji krótko- i długofalowego promieniowania w ulicznych kanionach miejskich (166).

Jedną z metod pozwalających na regulowanie mikroklimatu miasta jest wentylacja, którą determinuje m.in. gęstość tkanki miejskiej i wysokość budynków. Dowiedziono, że wśród zabudowy zdominowanej przez długie, wysokie budynki o zbliżonej wysokości ruch powietrza jest ograniczony. Jego przepływ poprawia się w momencie, gdy budynki z długimi fasadami są zróżnicowane wysokościowo i zorientowane pod odpowiednim kątem w stosunku do kierunku wiatru (165).

Inną strategią wpływającą na poprawę mikroklimatu miejskiego jest tworzenie odpowiedniej relacji pomiędzy wysokością budynków, a długością oraz szerokością ulicy. Wartość tę określa się jako współczynnik proporcji kanionu ulicznego (H/S). Idealny stosunek tych wartości zmienia się w zależności od strefy klimatycznej. Zgodnie z wynikami badań przeprowadzonych w Ghardaja (Algieria) (167), Beni-Isguen (Algieria) (139), Fez (Maroko) (168), Constantine (Algieria) (169), Damaszku (Syria) (170), Asuanie (Egipt) (162), czy Al Ain (Zjednoczone Emiraty Arabskie) (171) stosunek wysokości do szerokości (H/S) w regionach gorących i suchych powinien być wyższy od jedności ( $H/S > 1$ ). Im węższe ulice i wyższe budynki, a tym samym większe zagęszczenie tkanki urbanistycznej, tym warunki są bardziej znośne. Wprawdzie wykazano, że wraz ze wzrostem współczynnika proporcji kanionu ulicznego wzrasta również minimalna temperatura, jednak znacznie obniża się temperatura maksymalna. W trakcie badań udowodniono, że na obszarach

pustynnych stopień zacieniania, wpływający na wielkość strumienia promieniowania, a tym samym na średnią temperaturę promieniowania, stanowi znacznie bardziej efektywną strategię chłodzenia niż sama wentylacja (162).

Do warunków panujących w klimacie gorącym, suchym dostosowana jest tradycyjna zabudowa regionów pustynnych, którą cechują wąskie ulice, często przeznaczone wyłącznie dla ruchu pieszego, a także zwarta tkanka miejska w nieregularnym układzie (patrz: Rys. 4-2). Charakterystyczne dla tych regionów są budynki o grubych ścianach z wewnętrznymi atryami i małymi otworami okiennymi, jak też wznoszące zacinienie w poziomie ulicy podcienia, arkady oraz wspornikowe wykusze. Często spotykane są również części budynków całkowicie nadwieszane nad uliczkami, pozostawiające jedynie przejście w poziomie przyziemia. Pomimo że te formy architektoniczne wykazują tendencję do blokowania naturalnego przewietrzania, to jednak dzięki zjawisku wzajemnego zacieniania umożliwiają optymalną ochronę przed nagraniem powierzchni poziomych oraz pionowych, ograniczając tym samym nagrzewanie powietrza przez wtórne promieniowanie (172). Jedną ze stosowanych strategii pasywnych są również ściany z niewielkimi otworami, pełniące rolę osłon przeciwśonecznych, które stawiane są przed fasadami budynków (173).<sup>15</sup> Jak przytacza Mohamed (174) w klimacie pustynnym stosowanie pionowych elementów zacieniających jest bardziej efektywne w przypadku okien znajdujących się od strony wschodniej i zachodniej, elementy poziome sprawdzają się natomiast nad oknami południowymi.



Rys. 4-2 Schematyczne przedstawienie tradycyjnego układu urbanistycznego charakterystycznego dla regionów pustynnych na przykładzie historycznej części miasta Yazd w Iranie.

Opracowanie własne w oparciu o L. Zuaier, 2015 (37).

<sup>15</sup> W przypadku lokalizacji, w których w ciągu roku występują mroźne zimy istotne jest miejscowe wdrażanie w tkankę miejską szerszych ulic oraz otwartych przestrzeni w formie większych placów lub skwerów umożliwiających dostęp promieni słonecznych (168). Bez względu na to, latem, otwarte przestrzenie należy zabezpieczać przed bezpośrednim działaniem promieni słonecznych poprzez nasadzenie drzew bądź projektowanie elementów zacieniających, pozwalających na penetrowanie słońca w okresie chłodnym.

Innym sposobem pozwalającym na utrzymanie niskiej temperatury otoczenia jest odpowiedni dobór kolorów i rodzajów materiałów wykończeniowych na elewacjach i powierzchniach poziomych (174). Strategia ta umożliwi maksymalne wykorzystanie potencjału tych materiałów, ich właściwości termicznych – masy termicznej oraz dużej zdolności odbijania (albedo<sup>16</sup>), dzięki której można wpływać na wielkość pochłaniania promieniowania krótkofalowego, a poprzez to „sterować” bilansem cieplnym miasta (173). Z tego powodu w regionach pustynnych w celu utrzymania temperatury powierzchni na jak najniższym poziomie zalecane jest stosowanie jasnych okładzin o wysokim albedo, dzięki czemu są one w stanie odbić znaczną część promieniowania słonecznego.

Równie istotną strategią jest odpowiednia orientacja budynków w stosunku do pozornej drogi słońca po nieboskłonie. Orientacja ta powinna być adekwatna do charakterystycznego dla danej lokalizacji kąta padania promieni słonecznych (*ang. altitude*) oraz azymutu (*ang. azimuth*) Słońca. Obie te wartości zmieniają się zależnie od pory roku i dnia. Znaczna część obszarów gorących i suchych znajduje się w pobliżu zwrotników, gdzie w okresie najwyższych temperatur w wielu rejonach promienie słoneczne padają pod kątem 80°, w grudniu natomiast osiągając wartość kąta około 40°. Eksperymenty przeprowadzone w porze gorącej w centrum miasta Al Ain (171) wykazały, że w przypadku kanionów ulicznych o zbliżonych proporcjach (H/S) lepszy efekt chłodzący uzyskano, gdy ulice zorientowane były w kierunku północno-południowym (N-S). Hamdan i de Oliveira (171) potwierdzili także, że dla szerszych ulic lokowane wzdłuż osi N-S osiągnięto lepszy rezultat, niż dla wąskich uliczek orientowanych wzdłuż osi wschód-zachód (E-W). Podobne wyniki uzyskali Ali-Toudert i Mayer (175), których wyniki badań pokazały, że głębokie kaniony uliczne wzdłuż osi N-S tworzą najmniej uciążliwe warunki bytowe (poza godzinami południowymi), podczas gdy szerokie kaniony orientowane w kierunku E-W powodują, że organizm ludzki znacznie bardziej narażony jest na stres fizjologiczny (przegrzanie, *ang. heat stress*). Przyczynę takiego zjawiska stanowi fakt, że ulice wzdłuż osi N-S są krócej wystawione na bezpośrednie działanie promieni słonecznych (168), (175). Dalsze badania (139) wykazały, że orientacja ulic wzdłuż osi NW-SE stwarza bardziej dogodne warunki do życia, niż w kierunku NE-SW. Pomimo że mikroklimat powstały w wyniku orientacji północno-południowej stwarza największe poczucie komfortu latem, to z powodu braku dostępu światła spowodowanym wzajemnym zacienianiem budynków staje się dość problematyczny zimą. Ponadto jak podkreślają badacze (162), tworzenie ulic orientowanych wyłącznie w kierunku N-S w siatkach ortogonalnych w sposób oczywisty oznacza projektowanie sporej części ulic poprzecznych w kierunku E-W. Z tych względów wydaje się, że sytuowanie osi ulic wzdłuż kierunków pośrednich zdaje się być pożądanym kompromisem.

Nie mniejszy wpływ na odczuwalny przez mieszkańców komfort mają przestrzenie wspólne. Z tego względu budynki w klimatach gorących i suchych wznosi się wokół małych placów zacienianych przez wysoką roślinność, która pełni ważną rolę w utrzymaniu równowagi w środowisku miejskim. Podczas gdy drzewa redukują prędkość wiatru, jednocześnie zmniejszając stężenie zanieczyszczeń, niskie krzewy zatrzymują pyły przy ziemi, a dzięki swoim rozmiarom nie utrudniają wentylacji. Ilość promieniowania słonecznego docierającego do gruntu pod drzewem w okresie letnim wynosi

---

<sup>16</sup> *Albedo* – stanowi parametr określający zdolność danej powierzchni do odbijania promieni, wyrażany jako stosunek promieniowania odbitego do padającego. Jest to współczynnik bezwymiarowy mierzony w skali od 0 (całkowite pochłanianie promieniowania) do 1 (całkowite odbijanie promieniowania przez ciało).



10-30%, co wpływa na lokalne obniżenie temperatury oraz zmniejszenie ilości ciepła docierającego do budynków lub odbijanego wtórnie do atmosfery (165). Rośliny nie tylko pochłaniają promieniowanie słoneczne, ale również pozytywnie wpływają na zwiększenie wilgotności danego obszaru, co potwierdziły wyniki wielu badań (139), (169), (170), (171). Inne badania (176), które na przykładzie miasta Bagdad przeprowadzili Abraham, Taha i Hassan wykazały natomiast, że jeszcze lepszy wpływ na poprawę mikroklimatu miejskiego w kontekście optymalizacji komfortu termicznego mają naturalne i sztuczne elementy wodne.

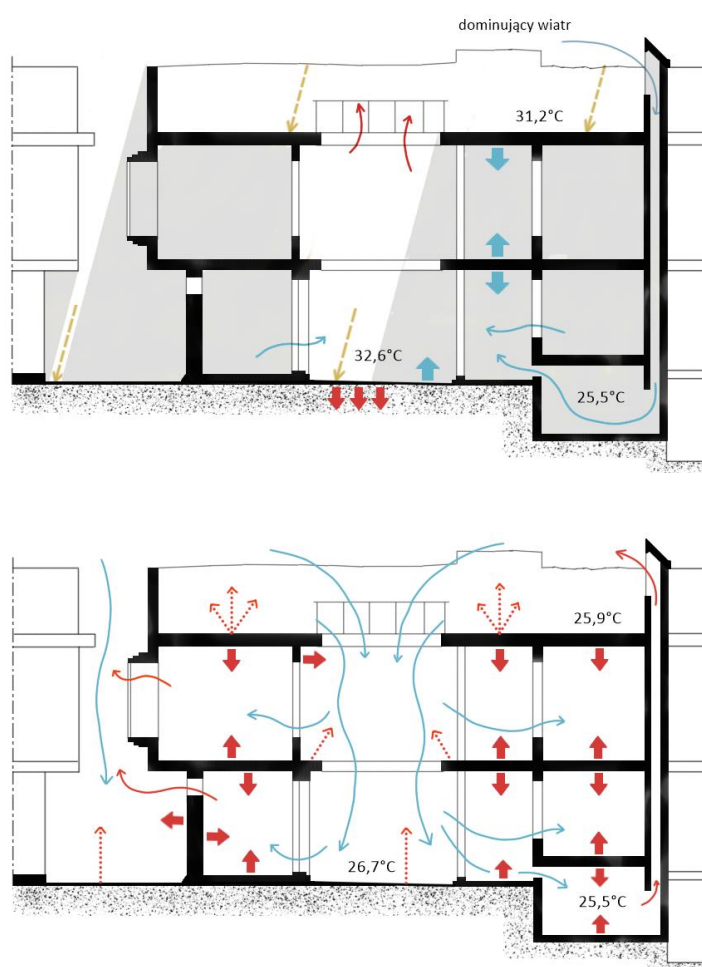
Zgodnie z wynikami badań przeprowadzonych w regionach pustynnych okazuje się, że różnica pomiędzy obszarami miejskimi, na których pokrywa roślinna zajmowała przynajmniej 20% a jałowymi przedmieściami wynosiła średnio około 2°C (177), co wskazuje na występowanie w miastach w ciągu dnia efektu miejskiej wyspy chłodu (163), który nie występuje w strefie klimatu umiarkowanego. Potwierdzają to wyniki badań prowadzonych przez Johanssona (168), który wykazał, że na przestrzeni roku w głębokich kanionach miejskich odczuwalna jest mniejsza różnica temperatur dziennych – niższa temperatura maksymalna oraz wyższa minimalna – w porównaniu do tych rejestrowanych na obszarach wiejskich, bądź w płytkich kanionach. W nocy natomiast w strefie gorącej i suchej można doświadczyć znacznie bardziej intensywnego – niż w strefach umiarkowanych – efektu miejskiej wyspy ciepła. Dzieje się tak dlatego, że zarówno zwarta zabudowa, jak też roślinność powodują, że dzienna amplituda temperatur w mieście jest mniejsza niż na przedmieściach. Powodem jest pokrywający ziemię piasek oraz brak zieleni, które przyczyniają się do znacznie szybszego wychładzania otoczenia po zachodzie słońca.

#### 4.3.2 ARCHITEKTURA RODZIMA

Niezależnie od typu klimatu wszystkie projektowane elementy budynku, stosowane rozwiązania i materiały powinny tworzyć spójny system, zapewniający warunki sprzyjające bytowaniu. Właściwy dobór konstrukcji oraz materiałów, będący częścią podejmowanych w trakcie procesu projektowego decyzji ma istotny wpływ na mikroklimat zarówno wewnątrz budynków, jak też bezpośredniego otoczenia. Mieszkańcy szukający wytchnienia od trudnych warunków zewnętrznych przez wieki zdołali opracować szereg efektywnych rozwiązań przy zastosowaniu lokalnych materiałów, które pozwoliły im na osiągnięcie relatywnego komfortu termicznego wewnątrz ich schronień. Elnabawi i Hamza podkreślają (178), że mieszkańcy regionów gorących są w stanie zaakceptować wyższe temperatury jako komfortowe, niż mieszkańcy strefy klimatycznej umiarkowanej cieplej. Co więcej, badania terenowe – ankiety, obserwacje i pomiary mikroklimatu – w Marakeszu (Maroko, Afryka) i Phoenix (Arizona, Stany Zjednoczone), które przeprowadzili Aljawabra i Nikolopoulou (179), wykazały istnienie różnic międzykulturowych i społeczno-ekonomicznych w wymaganiach dotyczących komfortu termicznego nawet między mieszkańcami tej samej – gorącej i skrajnie suchej – strefy klimatycznej.

Architekturę regionów pustynnych charakteryzuje masywna konstrukcja ścian oraz dachów. By maksymalnie ograniczyć wymianę ciepła pomiędzy wnętrzem, a środowiskiem zewnętrznym stosunek powierzchni ścian zewnętrznych do kubatury budynku jest redukowany do minimum. W klimacie gorącym, suchym w większości przypadków najbardziej pożądana jest wysoka masa akumulacyjna, dzięki czemu wnętrza budynków w ciągu dnia pozostają chłodne, a nocą są ogrzewane zakumulowaną energią (125), (139). W celu maksymalizacji łagodzącego wpływu tego zjawiska istotna jest regulacja przepływu powietrza. Przepływ ten, w ciągu okresów gorących powinien być ograniczany do minimum, a maksymalizowany w momencie, gdy temperatura

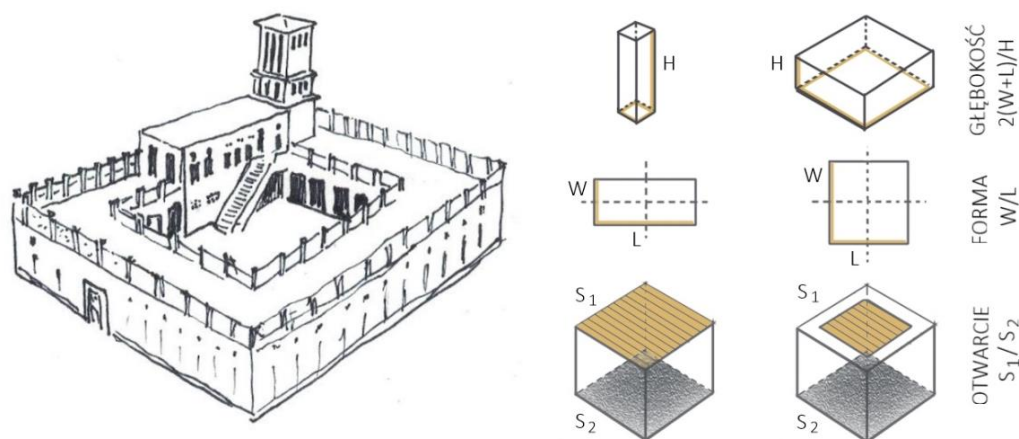
zewnątrzna osiągnię poziom komfortu (np. w nocy). W okresach wysokich temperatur zgromadzone za dnia przez masę akumulacyjną ciepło musi zostać usunięte z budynku w ciągu nocy poprzez wentylację (*ang. night purge ventilation*) (16). Naukowcy wykazali, że chłodzenie nocne staje się bardziej efektywne w przypadku budynków o dużej masie akumulacyjnej, gdy temperatura dzienna mieści się w zakresie 32-36°C (przy wyższych temperaturach strategia ta musi być wspierana innymi metodami, np. poprzez chłodzenie wyparne<sup>17</sup>), a nocą spada do 20°C (180). Z tego powodu powszechnym typem zabudowy stosowanym w tych regionach są zwarte, prostopadłościowe jedno-, bądź dwukondygnacyjne budynki wyposażone w dziedzińce wewnętrzne. Tradycyjnym elementem tych domostw, pozwalającym na uzyskanie optymalnego komfortu termicznego w godzinach popołudniowych są piwnice lub podziemne pomieszczenia mieszkalne. W okresie letnim temperatura w tych pomieszczeniach utrzymuje się zazwyczaj na w miarę stabilnym poziomie 25-28°C. Ponadto ich sufity znajdują się zwykle na poziomie około jednego metra powyżej poziomu posadzki dziedzińca, dzięki czemu do pewnego stopnia są one naturalnie doświetlane i wentylowane (17).



**Rys. 4-3** Wydajność cieplna tradycyjnego domu z dziedzińcem zlokalizowanego w Bagdadzie sporządzoną w oparciu o przeprowadzone przez Al-Azzawi pomiary temperatur (181). U góry: Wydajność cieplna budynku w okresie południa. U dołu: Wydajność cieplna budynku podczas nocy. Opracowanie własne na podstawie: H. A. Abdulkareem, 2016 (182).

<sup>17</sup> Chłodzenie wyparne – (inaczej adiabatyczne, ewaporacyjne) to proces zachodzący w wyniku chłodzenia przez odparowanie wody, gdzie energia jawna (temperatura) powietrza zostaje przekształcona na energię utajoną (wilgotność). Metodę tę wykorzystywano już w czasach starożytnych, choćby poprzez stosowanie nawilżanych tkanin do obniżania temperatury w pomieszczeniach (284).

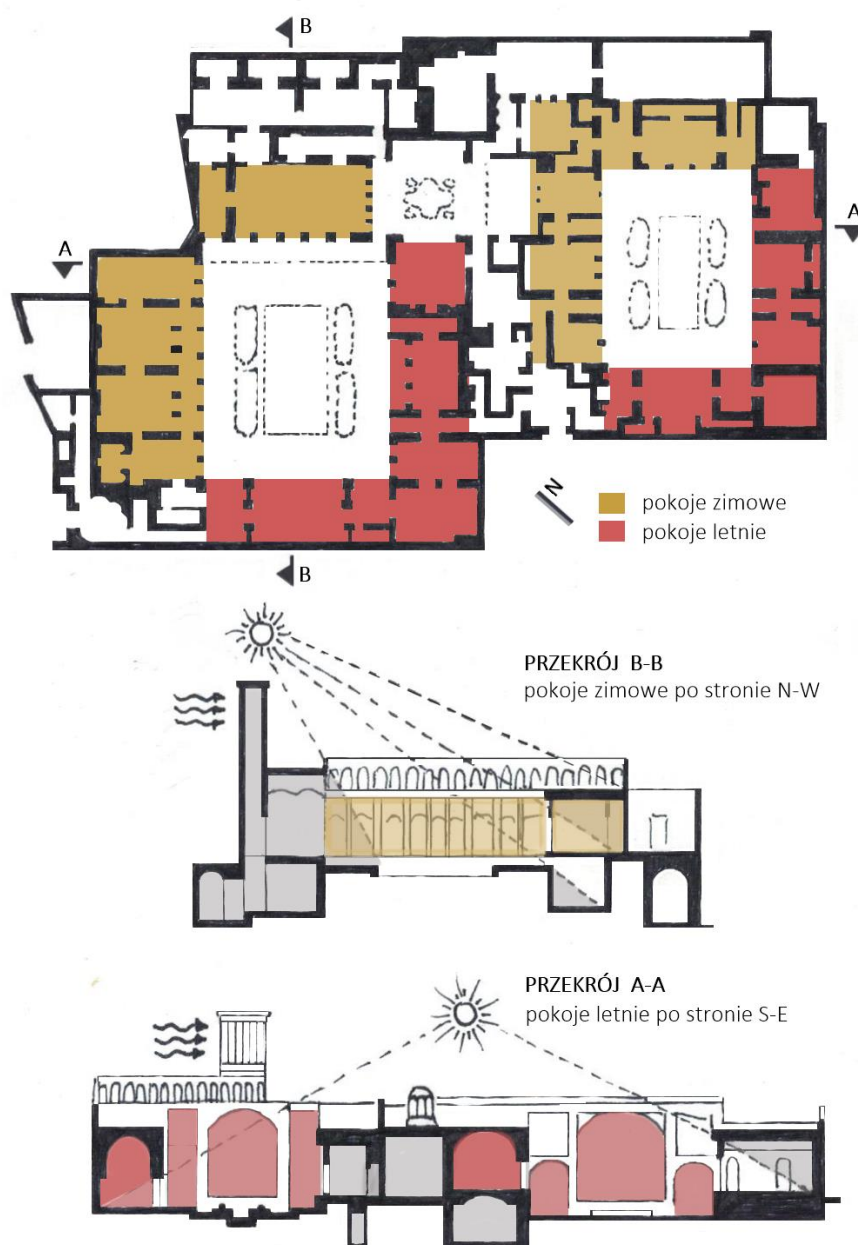
Domy z dziedzińcami popularne w tradycyjnej architekturze irańskiej, czy egipskiej są przykładem niskoenergetycznej zabudowy dopasowanej do lokalnych warunków, pozwalających między innymi na ochronę przed działaniem burz piaskowych, gorących wiatrów i promieniowania słonecznego. Dziedzińce znajdują się nieco poniżej poziomu ulic (17). Dzięki powstającemu na nich efektowi kominowemu zwiększany jest komfort termiczny. Przedstawione na rysunku 4-3 działanie tego efektu polega na tym, że znajdujące się na dziedzińcu ogrzane za dnia powietrze unosi się i jest stopniowo zastępowane chłodnym, nocnym powietrzem napływającym z góry (182). Ściany otaczające dziedziniec zacierają go, a poprzez to pozwalają na utrzymanie niższej temperatury przez znaczną część kolejnego dnia. Efektywność tego rozwiązania motywowana jest przez trzy następujące czynniki prezentowane na rysunku 4-4: (i) głębokość – stosunek obwodu dziedzińca do jego wysokości, który nie powinien wynosić mniej niż 3, (ii) formę – preferowane są dziedzińce prostokątne z zalecanym stosunkiem długości, szerokości i wysokości wynoszącym odpowiednio 1:2:1,4, (iii) otwarcie, czyli stosunek powierzchni prześwitu do powierzchni przyziemia (174). Ponadto w przypadku dziedzińców prostokątnych zalecane jest orientowanie ich dłuższej krawędzi wzdłuż osi wschód-zachód. Jak podaje Foruzanmehr (17), wschodnia elewacja dziedzińca jest wystawiona na działanie promieniowania słonecznego od wschodu słońca do południa. Temperatura powietrza w pomieszczeniach znajdujących się od tej strony znacznie zmniejsza się wieczorem, dlatego też często lokowane są tu sypialnie. Natomiast ze względu na to, że elewacja zachodnia dziedzińca oświetlana jest w godzinach popołudniowych, zwykle jest ona pustą ścianą bez otworów. W przeciwnym razie pomieszczenia znajdujące się od tej strony narażone byłyby na znaczne przegrzewanie.



Rys. 4-4 Przykład tradycyjnej zabudowy arabskiej z dziedzińcem oraz czynniki, wpływające na efektywność tego rozwiązania. Opracowanie własne na podstawie M. Mohamed, 2010 (174).

Przepływ powietrza przez dziedziniec może być dodatkowo wzmagany przez tzw. *taktabush*. Jest to znajdująca się w przyziemiu zacieniona przestrzeń przeznaczona do siedzenia, która zwykle łączy większą otwartą przestrzeń, taką jak ogród, z dziedzińcem. Ze względu na funkcję jaką pełni łącznik optymalnym rozwiązaniem jest umiejscawianie go adekwatnie do lokalnych przeważających wiatrów oraz ścieżki słońca (174). Opisywany powyżej typ zabudowy pozwala

dopasować przestrzeń wewnętrzną do potrzeb użytkowników w zależności od pory roku. Z tego względu pokoje i przestrzenie zlokalizowane od strony północnej, która poddawana jest bezpośredniemu działaniu promieni słonecznych są używane jako część mieszkalna w porze chłodnej. Natomiast te od strony południowej, znajdujące się przez większość czasu w cieniu, służą użytkownikom w okresie letnim (17). Opisywane zjawisko nomadyzmu sezonowego przedstawiono na rysunku 4-5. Adaptacja behawioralna ludzi, która przejawia się w formie migracji zwanej nomadyzmem wewnętrznym zachodzi również w ciągu dnia, gdy mieszkańcy przemieszczają się pomiędzy kolejnymi poziomami budynku w poszukiwaniu optymalnych warunków klimatycznych.



Rys. 4-5 Sezonowy nomadyzm wewnętrzny. Przestrzenie letnie i zimowe.  
Oprac. własne na podstawie S. R. Hosseini i in. 2015 (183).

W regionach pustynnych wznoszone są często także łapacze wiatru, w Egipcie zwane *malqaf* (174) a w Iranie *badgir* (17) (*ang. wind-catcher*), które umożliwiają pasywną wentylację budynku. Te wystające ponad dachami budynków elementy architektoniczne posiadają otwory skierowane zwykle w kierunku przeważających wiatrów. W ten sposób łapacze wyłapują silniejsze i chłodniejsze powietrze z wyższych warstw i dzięki różnicy ciśnień kierują je do wnętrza budynków. W przypadku, gdy łapacze są zamontowane przeciwnie do kierunku wiatru, bądź gdy wiatru w ogóle nie ma, działają one na zasadzie kominów, dając tym samym możliwość usunięcia gorącego powietrza z wnętrza budynków. Innym tradycyjnym sposobem obniżania temperatury w budynkach było chłodzenie geotermalne. Bazowało ono na systemie podziemnych rur, którymi schłodzone powietrze doprowadzane było do domostw (37).

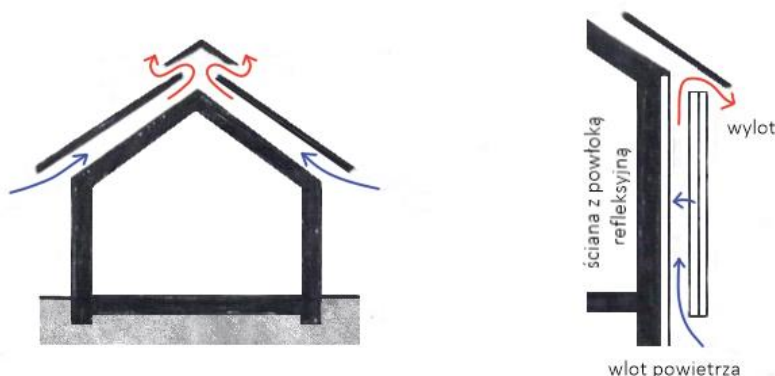
Budynki w klimacie suchym i gorącym charakteryzują masywne ściany i sklepienia, zwykle murowane, doskonale działające jako masa akumulacyjna, a jednocześnie pozwalające na zmniejszenie dobowej amplitudy temperatur (184). Szczególnie efektywne w zapewnieniu wysokiego komfortu termicznego są dachy kopulaste i sklepione (159). Struktury te poprzez podwyższenie wewnętrznej wysokości pomieszczeń tworzą przestrzeń dla unoszącego się w górę ciepłego powietrza, które jest stamtąd stopniowo usuwane. Ponadto ich forma sprawia, że przez większość dnia jakaś ich część znajduje się w cieniu, wzmagając tym samym transmisję ciepła z wnętrza budynku (174).

Z oczywistych względów dachy stanowią element trudny do zacienienia. Z tego powodu są najbardziej narażone na działanie promieniowania słonecznego. W regionach pustynnych jest to przyczyną występowania wielu problemów eksploatacyjnych. Dach – jako przegroda budowlana – jest narażony na najsilniejsze zyski i straty ciepła, a oddziaływania termiczne występują tu w największej skali. Te procesy przenikania ciepła w znacznej mierze zależą od kształtu dachu oraz materiału jego poszycia. Natomiast w niewielkim stopniu wpływa na nie konstrukcja nośna (125). Wyniki badań pokazują, że w przypadku wykonywania zielonych dachów temperatura przegrody może być niższa niż temperatura powietrza, podczas gdy tradycyjne dachy mogą w tym czasie nagrzewać się nawet do 50°C (165). Rozwiązanie to nie powinno jednak zastępować warstwy izolacyjnej, a samą roślinność należy dobrać adekwatnie do klimatu.

Warto dodać, że jedną z tradycyjnych metod służących ograniczeniu przenikania ciepła przez dach jest stosowanie kulistych ceramicznych naczyń, które są równomiernie rozmieszczone na jego powierzchni, otworem do dołu. Powoduje to powstanie miejscowych „poduszek” nieruchomego powietrza, które działają jak izolacja. Z kwerendy przeprowadzonej przez autorkę wynika, że jest to rozwiązanie popularne w hinduskim regionie Gudżarat, który leży w strefie klimatycznej tropikalnej, jednak – ze względu na dużą operację słońca – może być również stosowane w klimacie gorącym, skrajnie suchym (185).

Przy projektowaniu kształtu dachu istotne jest uwzględnienie ilości opadów atmosferycznych, wpływu słońca, czy choćby sposobu użytkowania. W regionach gorących, suchych jednym z tradycyjnie stosowanych rozwiązań są tzw. latarnie – otwory w płaskich stropodachach przykryte lekką konstrukcją z drewna i szkła, które pozwalają na wentylowanie piętър znajdujących się poniżej (174). Poza tym stosuje się także stropodachy wentylowane, których warstwę zewnętrzną stanowi lekki dach, a wewnętrzną – masywny strop pokryty materiałem odbijającym promieniowanie (np. folią aluminiową), pozwalającym na ograniczenie pochłaniania ciepła uwalnianego w wyniku promieniowania (patrz: Rys. 4-6). Ciepło to ogrzewa powietrze

w przestrzeni wentylowanej, które następnie jest natychmiast usuwane w wyniku przepływu powietrza. Podobne zalety oraz zasadę działania mają ściany szczelinowe z wewnętrzną warstwą refleksyjną. W wypadku takich rozwiązań należy jednak pamiętać, aby stworzyć dogodne warunki wymuszające przepływ powietrza wewnątrz szczeliny. Podczas projektowania izolacji budynku trzeba zwrócić uwagę na to, że warstwa refleksyjna nie tylko zapewnia ochronę przed nadmiernym zyskiem ciepła, ale również zabezpiecza przed jego utratą, co może przyczynić się do przegrzania pomieszczeń. Z tego względu istotny jest staranny dobór materiałów i rozwiązań adekwatnych do wybranej lokalizacji oraz wykonanie bilansu zysku i strat w ciągu dnia.



Rys. 4-6 Schemat przedstawiający sposób działania wentylacji pasywnej w przypadku stosowania przegród dwuwarstwowych. Oprac. własne na podstawie P. Gut i D. Ackerknecht, 1993 (125).

W przypadku klimatu pustynnego doskonale sprawdzającym się rozwiązaniem są ściany pełne wykonane z ubijanej ziemi, cegły bądź kamienia, tynkowane mieszanką błota i słomy, posiadające jasną powierzchnię zewnętrzną. W swojej książce Foruzanmehr (17) pisze, że w tym typie klimatu największe znaczenie przy zmniejszaniu obciążeń wynikających z potrzeby chłodzenia budynków mają grubość oraz kolor ścian. Masywne ściany o grubości 50-80 cm pozwalają na maksymalne czerpanie korzyści z magazynowania w nich ciepła i uwalniania go do wnętrza budynku z opóźnieniem, w momencie, gdy jest to najbardziej pożądane, czyli w nocy. Ściany budynków tynkowano. Naturalne materiały dobierano w zależności od tego, co było lokalnie dostępne. W Maroku opracowano między innymi *tadelakt*, czyli technikę kładzenia tynku wapiennego, będącego mieszanką wapna i drobnego piasku, pyłu marmurowego, bądź popiołu drzewnego (z liści palmowych). Białe tynki, nie tylko tworzyły wodoodporną, oddychającą powłokę, ale również pozwalały na nadanie powierzchniom wysokiego współczynnika odbicia.

Podczas projektowania niezwykle ważne jest także określenie liczby oraz rodzaju otworów zewnętrznych. Szczególną uwagę należy zwrócić na ograniczenie projektowania otworów znajdujących się od strony narażonej na intensywne działanie bezpośrednich promieni słonecznych. Właściwe rozmieszczenie otworów ma w okresie letnim zapewnić naturalne przewietrzanie, które w tym typie klimatu wykorzystywane jest jako jedna z głównych strategii chłodzenia pasywnego (16), (37). Zimą natomiast należy ograniczać straty ciepła (184). Z uwagi na to, że w regionach pustynnych promieniowanie słoneczne w okresie letnim jest najbardziej intensywne od strony wschodniej i zachodniej, zimą zaś od strony południowej, optymalne jest rozmieszczanie otworów na ścianach południowej i północnej (186). Ich wielkość powinna być ograniczona do minimum, lub otwory powinny mieć możliwość regulowania ilości wpadającego

światła. W jednym z artykułów St Claire sugeruje (186), aby – ze względu na niski kąt padania promieni słonecznych o poranku i wieczorem – pozbawione otworów elewacje wschodnią i zachodnią wykorzystać jako bufory masy termicznej. Większe otwory wyposażone w systemy, umożliwiające regulowane przepuszczanie światła dziennego, mogą być natomiast sytuowane na elewacji północnej, która w przypadku półkuli północnej jest najmniej nasłoneczniona.

Wyniki badań udowodniły, że redukcja liczby i wielkości otworów okiennych oraz rozmieszczenie ich na przeciwległych elewacjach, od strony nawietrznej i zawietrznej, pozwoliły zmniejszyć zużycie energii do 55%. Ponadto wykazano, że stosunek powierzchni przeszkleń do powierzchni podłogi powinien znajdować się w przedziale 1:10-1:20 (37). Mohamed tłumaczy (174), że stosowanie większych przeszkleń w środowisku pustynnym jest możliwe, pod warunkiem stosowania odpowiednio zaprojektowanych detali okien. W klimacie tym swoją funkcję spełniają długie poziome pasy okien, bądź okna wysokie z otworami na górze (wylot gorącego powietrza) oraz u dołu (wlot zimnego powietrza). Przy projektowaniu otworów warto zwrócić uwagę na to, że powierzchnia otworów wlotowych powinna być równa powierzchni otworów wylotowych (37). Sprawdzonej metodą jest stosowanie okiennic, elementów nadwieszanych, czy też różnego rodzaju przeston umożliwiających kontrolowanie ilości wpadającego światła, czy przepływu wiatru, jak np. *mashrabiya*, która może zastąpić nawet całą ścianę budynku. Istotne jest także stworzenie możliwości szczelnego zamykania otworów w celu zabezpieczenia się przed pustynnym piaskiem i pyłem (125). Ponadto przy projektowaniu trzeba uwzględnić kąt padania promieni słonecznych zmieniający się w zależności od pory roku. W przypadku projektowania przegród szklanych w strefach gorących i suchych, gdzie kąt padania promieni słonecznych jest stromy, należy pamiętać, że promienie te są niemalże w całości odbijane i docierają w głąb kanionu ulicznego. Na skutek tego zjawiska ilość docierającej tam energii jest niemalże podwojona, powodując tym samym obniżenie komfortu cieplnego oraz obciążenie cieplne budynków znajdujących się w ich otoczeniu. Z tego względu zalecane jest unikanie projektowania budynków o dużej liczbie przeszkleń, jak też niestosowanie jako wykończenie fasad materiałów silnie odbijających, np. aluminium (166).

W okresie zimowym dobry sposób na zapewnienie izolacji nocą stanowią grube, wykonane z tkanin zasłony zawieszane w oknach. Latem natomiast doskonale sprawdzają się fontanny – otwarte zbiorniki wodne, lokowane w centrum dziedzińca (174) lub na podwórku od strony występowania przeważających kierunków wiatru. Dzięki temu rozwiązaniu napływające powietrze zostaje schłodzone i zwilżone przed dotarciem do budynku (184). Efektywną strategią jest także sadzenie drzew liściastych przed budynkami, co pozwala na zacienienie jego ścian oraz redukcję zjawiska ośnienia w okresie intensywnego działania promieni słonecznych. Poza tym roślinność nawilża powietrze, ogranicza ilość piasku i pyłów oraz daje możliwość sterowania przepływem wiatru.

#### 4.3.3 LOKALNE MATERIAŁY

W przypadku przegród budynków regionów pustynnych wymagana jest ich wysoka zdolność magazynowania ciepła, a jednocześnie duża odporność pozwalająca na zminimalizowanie przewodzenia ciepła do wnętrza budynku w ciągu dnia (174). Tradycyjnie stosowanymi materiałami w regionach gorących, skrajnie suchych są kamień, drewno, ziemia oraz glina, z której wyrabia się cegły.

Ziemia<sup>18</sup> charakteryzuje się dobrą izolacyjnością cieplną (stosunkowo niski współczynnik przewodzenia ciepła,  $\lambda$  ziemi =  $0,14 \div 1,1$  W/(m·K) w zależności od mieszanki (187)) oraz doskonałą pojemność cieplną, czyli zdolność akumulowania i oddawania ciepła. Materiał ten sprawdza się w klimacie pustynnym (188), tym bardziej, że jest dostępny bez prowadzenia dodatkowych prac odkrywkowych, ponieważ w środowisku pustynnym gleba często w ogóle nie występuje, a ziemia jest najwyższą warstwą litosfery. Przegrody wykonane z ziemi mają jednak tendencję do kurczenia się i pęknięcia w trakcie wysychania. Z tego względu, ziemię często mieszano z włóknami organicznymi, które pełniły rolę zbrojenia rozproszonego, zwiększając tym samym spistość oraz wytrzymałość materiału (187). Ze względów na właściwości termiczne dobrze funkcjonujące materiały stanowią również glina i błoto (mieszanka lokalnej ziemi i wody). Cegły wypalane z tych materiałów – w zależności od porowatości – charakteryzuje średnia lub wysoka pojemność cieplna, dzięki czemu w okresie letnim wewnątrz budynków zapewnione mogą być stabilne warunki. Zimą jednak ten typ konstrukcji wymaga zużycia większej ilości energii na ogrzewanie (17). Porowata struktura wpływa na to, że cegły te posiadają również zdolność do regulowania poziomu wilgoci. W klimacie gorącym i suchym z uwagi na brak paliwa do prowadzenia wypału bardziej praktyczne są cegły z gliny niewypalanej (adobe), suszonej na słońcu. Charakteryzuje je większy opór cieplny, jednak mniejsza wytrzymałość mechaniczna. Ze względu na większą higroskopijność (zdolność pochłaniania wody) materiał ten należy zabezpieczać przed zacinającym deszczem i zbyt dużą wilgocią (125).

Glinę, również obecnie, stosuje się często na pokrycia dachu w postaci dachówek ceramicznych, które cechują dość dobre właściwości termiczne. Trzeba pamiętać jednak o tym, że pomiędzy poszczególnymi ceglanyymi płytkami przez szczeliny przepływa powietrze z zewnątrz. Materiał ten podobnie jak łupek wymaga mocnej konstrukcji nośnej. Łupek, jako naturalny kamień służy do wykonywania takich elementów, jak ściany czy pokrycia dachowe. Jego właściwości termiczne są zbliżone do charakterystyki dachówek betonowych, jednak w porównaniu do nich łupek ma mniejszą pojemność cieplną. Oczywiście, w dużej mierze stopień pochłaniania ciepła zależy od grubości oraz albedo powierzchni kamienia.

Należy wspomnieć również o coraz częściej stosowanych monolitycznych płytach betonowych, które cechuje słaby opór cieplny, ale duża pojemność cieplna. Z tego względu spora masa akumulacyjna sprawia, że beton jest stosunkowo chłodny o poranku, ale nagrzewa się, oddając zmagazynowane za dnia ciepło do wnętrza budynku wieczorem i w nocy. Identycznie funkcjonują ściany wykonane z pełnych bloczków betonowych. Bloczki z wydrążonymi wewnątrz otworami mają mniejszą masę, więc charakteryzuje je też mniejsza zdolność akumulacyjna. Mają jednak lepszą izolacyjność termiczną.

#### 4.4 WYZWANIA PROJEKTOWE | ZALECENIA DLA PROJEKTANTÓW

Powyższy przegląd rozwiązań stosowanych w architekturze rodzimej w strefach gorących, suchych oraz przeprowadzona w rozdziale trzecim analiza warunków klimatycznych umożliwiają wskazanie wyzwań towarzyszących ekstremalnie wysokim temperaturom i niskiej wilgotności. Tym warunkom muszą sprostać budynki i projektujący je architekci. Wyzwania te pojawiają się zarówno w skali makro (miasta i osiedla), jak i mikro (budynki). W wyniku przeprowadzonych

---

<sup>18</sup> Ziemia – oznacza górną warstwę litosfery, znajdującą się poniżej gleby, do głębokości oddziaływania człowieka (291).



analiz autorka pracy stwierdziła, że główną strategią projektowania w strefach gorących, suchych jest ograniczenie odczuwalnego dyskomfortu cieplnego poprzez zapewnienie odpowiednich poziomów zacienienia, wilgotności oraz ruchu powietrza.

**Wyzwanie 1.** Budynki należy przystosować do skrajnych warunków panujących latem i zimą, ale też za dnia i w nocy. W tym celu konieczne może okazać się stosowanie pasywnych metod chłodzenia (lato/dzień), jak też ogrzewania (zima/noc). Przykładowo, w sezonie letnim należy skupić się na minimalizowaniu zewnętrznych, jak i wewnętrznych zysków ciepła w ciągu dnia i maksymalizowaniu jego strat w nocy. Należy również pamiętać, że wysokie amplitudy temperatur mają także wpływ na rozszerzalność poszczególnych części budowli i ewentualną korozję elementów budynku (173). W tym wypadku istotną kwestię pełni odpowiedni dobór materiałów konstrukcyjnych i technologii budowy oraz analiza ich wpływu na bezwładność cieplną budynku. Te o wysokiej bezwładności cieplnej są w stanie utrzymać relatywnie stałą temperaturę z powodu magazynowania ciepła za dnia. Ciepło jest sukcesywnie oddawane, gdy temperatura powietrza stopniowo się obniża. Doskonale sprawdzają się w tym wypadku lokalne materiały, jak muł czy glina, które dzięki dużej masie akumulacyjnej absorbują ciepło, zmniejszając ilość promieniowania odbitego, co pozwala na zminimalizowanie temperatury otoczenia. Ponadto grube ściany wpływają na ograniczenie dobowej amplitudy temperatur (173).

**Wyzwanie 2.** W klimacie gorącym, suchym niezbędna jest ochrona przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym, które w tych regionach jest większe z uwagi na znacznie mniejsze zachmurzenie (173). Sprawdzone metody przy redukcji intensywnego promieniowania w klimacie gorącym oraz suchym to projektowanie zapewniającej cień gęstej zabudowy i zwartych form budynków (172) oraz zacienianie szerokich ulic poprzez nasadzenie drzew o rozłożystych koronach. Rozwiązania te są równie skuteczne przy ograniczaniu występowania zjawiska olśnienia od szklanych ścian budynków (189). W ogólnym bilansie należy również uwzględnić promieniowanie odbite od ziemi i sąsiednich budynków, których zdolność odbijania (albedo) lub pochłaniania światła wyraża się odpowiednio udziałem promieniowania odbitego, bądź pochłoniętego w procentach promieniowania całkowitego (173). W tabeli 4-1 przedstawiono wartości zdolności pochłaniania promieniowania dla wybranych powierzchni, z której wynika, że im ciemniejszy materiał, tym bardziej się nagrzewa w wyniku pochłaniania promieniowania słonecznego.

Rodzaj powierzchni	Zdolność pochłaniania [%]
Woda	70-95
Świeża pokrywa śnieżna	5-30
Stara pokrywa śnieżna	30-70
Jasny piasek wydmowy	40-70
Gleby piaszczyste	60-85
Łąki, pastwiska	72-83
Suche trawy	70-82
Las liściasty	83-91
Las iglasty	86-96
Tkanka urbanistyczna	70-85

**Tab. 4-1** Zdolność pochłaniania promieniowania przez wybrane powierzchnie. Oprac. własne na podstawie: G. Flemming, *Klimat-środowisko-człowiek*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1983.

**Wyzwanie 3.** Należy zapewnić regulowaną cyrkulację powietrza, a także ochronę przed burzami piaskowymi (173) oraz nieustannie nanoszonymi przez wiatr kurzem i pyłem. Ważny więc jest wybór lokalizacji i orientacji budynku zgodnie z kryteriami mikroklimatycznymi, przy jednoczesnym uwzględnieniu przeważających kierunków wiatrów.

**Wyzwanie 4.** W regionach przybrzeżnych wyższa wilgotność sprawia, że w okresie letnim wymagana jest wzmożona cyrkulacja powietrza. Wilgotne powietrze rozprasza promieniowanie słoneczne obniżając jego intensywność, a tym samym zmniejszając ilość ponownego wypromieniowania na nocne niebo.

**Wyzwanie 5.** W regionach pustynnych ważne jest zapobieganie występowaniu efektu nocnej miejskiej wyspy ciepła. Prowadzone przez badaczy w ostatnich latach analizy lokalnych temperatur wykazały, że zjawisko to jest bardziej intensywne od identycznego występującego w strefach umiarkowanych i tropikalnych za dnia. W strefach gorących, suchych za dnia panuje zjawisko odwrotne – rejony miejskie charakteryzują się niższą temperaturą niż sąsiadujące z nimi obszary wiejskie, bądź podmiejskie. Głównie spowodowane jest to obecnością terenów zielonych w miastach (parków, ogrodów) znacznie wpływających na obniżenie temperatury otoczenia poprzez ewapotranspirację<sup>19</sup> (172), (177), (190).

**Wyzwanie 6.** W miastach, ale również w obrębie poszczególnych budynków, należy przewidzieć przestrzeń na zieleń. Odpowiednio dobrana do typu klimatu roślinność istotnie wpływa na poprawę mikroklimatu, wzbogacając bioróżnorodność i zwiększając jakość przestrzeni życiowej, mogącej tym samym służyć wielu różnym funkcjom. W regionach suchych chroni przed gorącymi i pyłącymi wiatrami, a dzięki czynnemu parowaniu wody (transpiracji) i zacienieniu jakie generuje, lokalnie obniża temperaturę. Zieleń, poprzez gromadzenie znacznej ilości wód opadowych, a następnie stopniowe jej uwalnianie w procesie transpiracji, wpływa łagodząco na zmiany wilgotności powietrza. Dzięki jej regulującemu działaniu przyczynia się pośrednio do redukcji kosztów eksploatacji urządzeń, poprzez zmniejszenie zużycia energii, ograniczając także ich negatywny wpływ na środowisko. Na przykładzie tabeli 4-2 (125) wyraźnie dostrzec można działanie efektu chłodzącego zieleni:

Rodzaj nawierzchni i wystawa	T [°C]
Dach łupkowy w słońcu	43°C
Powierzchnia betonowa w słońcu	35°C
Krótką trawą w słońcu	31°C
Powierzchnia liści drzewa w cieniu	27°C
Krótką trawą w cieniu	26°C

**Tab. 4-2** Pomiary temperatur różnych nawierzchni wykonane w RPA w zależności od rodzaju i wystawy na słońce. Oprac. własne na podstawie: P. Gut i D. Ackerknecht, Climate Responsive Building – Appropriate Building Construction in Tropical and Subtropical Regions, St. Gallen: SKAT.

<sup>19</sup> *Ewapotranspiracja* – dzielona na potencjalną i rzeczywistą, określającą ilość pary wodnej uwalnianej do atmosfery w danym okresie. Pojęcie stanowi sumę ewaporacji, czyli parowania z powierzchni gleby i transpiracji, parowania z pokrywy roślinnej adekwatnej do jej stadium rozwoju i aktywności przy uwzględnieniu danych warunków meteorologicznych (285).







# 5

## Adaptacja

Od wyzwania do biologii

## 5 ADAPTACJA

---

### 5.1 FAZA I | OKREŚLANIE WYZWANIA

Analiza wyników dotychczasowych badań przeprowadzona w poprzednich rozdziałach wyraźnie wskazuje, że **osiągnięcie optymalnego komfortu termicznego wewnątrz budynków w regionach pustynnych** stanowi istotny problem. Ważne zatem jest szukanie sposobów na jego rozwiązanie. W poprzednim rozdziale przedstawiono szereg wyzwań, którym sprostać muszą architekci projektujący w klimacie gorącym i skrajnie suchym. Dalsza część dysertacji poświęcona jest opracowaniu rozwiązania inspirowanego naturą, projektowanego zgodnie z założeniami biomimikry, które pozwoliłoby przystosować budynki do ekstremalnych warunków środowiska gorącego i skrajnie suchego.

W *fazie I*, będącej pierwszą częścią cyklu projektowania opartego na założeniach biomimikry, sformułowano wyzwanie projektowe, a następnie – w oparciu o dotychczasowe analizy – opisano podłoże i okoliczności towarzyszące specyficzne dla rozwiązywanego problemu. Na tej podstawie ustalony został mechanizm naturalny (funkcja biologiczna), który jest realizowany przez badane organizmy. Ostatecznie zidentyfikowano także ograniczenia projektowe oraz określono aspiracyjne cele projektowe.

#### 5.1.1 OGÓLNE PODŁOŻE PROBLEMU

Według raportu IPCC (191) regiony hiper-suche (indeks suchości,  $AI < 0,05$ ) i suche ( $0,05 < AI < 0,20$ ) stanowią obecnie odpowiednio 6,9% i 12,4% globalnej powierzchni lądowej. To samo źródło podaje, że tereny te są zamieszkiwane przez około 0,5 miliarda osób. Jednak według przewidywań naukowców do 2050 roku liczba ta ma się niemal podwoić. Powodem jest wywołane działaniami człowieka postępujące zjawisko pustynnienia. Mieszkańcy wspomnianych regionów na co dzień muszą mierzyć się z wieloma występującymi tu problemami. Wśród nich wymienić można między innymi zasolenie gleb, intensywne promieniowanie słoneczne, brak wody oraz opadów, znaczne wahania temperatur rocznych i dobowych. Duże amplitudy temperatur charakterystyczne dla środowiska gorącego, skrajnie suchego stanowią istotny czynnik wpływający na kształtowanie komfortu cieplnego wewnątrz budynków (17), w których ludzie spędzają coraz więcej czasu, nawet ponad 90% (146), (192).

Foruzanmehr wskazuje (17), że problemem współczesnej architektury regionów pustynnych są zmiany zachodzące od początku XX wieku w tradycyjnych sposobach kształtowania przekrojów ulic, budynków mieszkalnych, czy organizacji pracy w miastach. Zmiany te obecnie postępują szybciej, niż kiedykolwiek wcześniej. Spowodowane to jest między innymi przez rewolucję przemysłową, postęp technologiczny, czy globalizację. W wyniku połączenia tych czynników rosną wymagania i aspiracje współczesnych użytkowników.

Wymagania te i aspiracje spowodowały, że większość XX-wiecznych budynków realizowanych w regionach pustynnych została uzależniona od klimatyzacji i zasilającej ją elektryczności (37), (105), (107), (179). Problem jest tym bardziej istotny, iż dowiedziono, że energia wykorzystywana na wentylację mechaniczną odpowiada średnio ponad 70% energii elektrycznej zużywanej w gospodarstwach domowych (186), (165), (193) w tej strefie klimatycznej. Ponadto coraz dłuższe okresy utrzymujących się wysokich temperatur wynikające z ocieplającego się klimatu wpływają na to, że utrzymanie optymalnych warunków termicznych w mieszkaniach wymaga większego nakładu energii, co jednocześnie przyczynia się do wzrostu emisji gazów cieplarnianych (17).

Wzrastająca świadomość ludzi w kontekście ich wpływu na degradację środowiska naturalnego powoduje, że na świecie pojawia się coraz więcej rozwiązań pasywnych, pozwalających na tworzenie zeroemisyjnych budynków dostosowanych do lokalnych uwarunkowań. Podobne tradycyjne techniki od wieków rozwijane były przez ludność regionów pustynnych. Obecnie zauważyć można rosnące zainteresowanie adaptacją dawnych rozwiązań do współczesnych wymogów użytkowników z uwagi na to, że mają one wyraźny potencjał ograniczenia potrzeby korzystania z mechanicznych systemów klimatyzacyjnych.

### 5.1.2 BEZPOŚREDNIE OKOLICZNOŚCI TOWARZYSZĄCE PROBLEMOWI

Osiągnięcie komfortu termicznego wewnątrz budynków wznoszonych w regionach pustynnych stanowi ogromne wyzwanie, głównie ze względu na znaczne wahania temperatur w skali doby i roku, jak i intensywne działanie promieniowania słonecznego, wynikające z braku zachmurzenia przez ponad 70% czasu (42). W okresie gorącym za dnia temperatura powietrza wynosi średnio ponad 40°C, podczas gdy w nocy obniża się do około 15-20°C. W chłodnej porze natomiast temperatura za dnia wzrasta do około 25-30°C, nocą zaś spada o ponad 20°C, niekiedy osiągając poziom poniżej 0°C (16), (34). Znacznie większe wahania temperatur odnotowywane są przy gruncie, gdzie amplituda dobową może wynieść nawet 85°C. Przyczyną powstawania tak dużych różnic temperatur w ciągu doby jest bardzo niska wilgotność powietrza, wynosząca zwykle poniżej 30%.

Dotychczasowe doświadczenia pokazały, że najlepszymi strategiami pozwalającymi na radzenie sobie z wahaniami temperatury są: zapobieganie nagrzewaniu, odprowadzanie ciepła i pasywne ogrzewanie w okresie zimnym. Efekty te mogą zostać osiągnięte między innymi poprzez chłodzenie przez parowanie (ewaporacyjne), naturalną wentylację, projektowanie stref buforowych, jak również stosowanie elementów zacieniających, jasnych powierzchni wykończeniowych oraz materiałów o wysokiej pojemności cieplnej (17), (37).

Współcześnie, jedną z metod radzenia sobie z nadmiernym działaniem promieniowania słonecznego w regionach pustynnych, stanowią adaptowalne fasady kinetyczne (70), (194), (195). Są to z jednej strony rozwiązania zaawansowane technologicznie i energooszczędne, ale z drugiej narażone na awarie (np. pod wpływem burz piaskowych), oparte na importowanych technologiach i bardzo kosztowne, więc rzadkie. Redukowanie ilości promieniowania oddziałującego na wnętrza budynków jest możliwe również dzięki dodatkowym powłokom refleksyjnym, które pod wpływem temperatury, promieniowania, bądź impulsów elektrycznych zmieniają przezroczystość szyb, tym samym zapobiegając nadmiernemu przegrzewaniu pomieszczeń (106).

### 5.1.3 POSZUKIWANA FUNKCJA

Analiza problemu, jakim jest kształtowanie komfortu termicznego wewnątrz budynków w regionach pustynnych oraz wskazanie głównych naturalnych czynników, które na niego wpływają, umożliwiają określenie funkcji, jakie pełnić mają poszukiwane modelowe mechanizmy adaptacyjne wykształcone przez organizmy żywe. Adekwatnie do tych czynników: (i) dużych rocznych i dobowych wahań temperatury, (ii) nadmiernego promieniowania słonecznego, należy w takim razie zadać sobie pytania w jaki sposób natura:

**Funkcja pierwotna:** *reguluje temperaturę w środowisku gorącym i suchym?*

**Funkcja uzupełniająca:** *chroni się przed promieniowaniem słonecznym?*

#### 5.1.4 CEL PROJEKTOWANIA

Celem procesu projektowania rozwiązania inspirowanego naturą opartego na założeniach biomimikry jest znalezienie nowego, przyjaznego środowisku i efektywnego sposobu, który pozwoliłby na dynamiczne adaptowanie budynków mieszkalnych w regionach gorących, skrajnie suchych tak, aby wewnątrz odczuwalny był przez użytkowników optymalny komfort termiczny. Zamysłem jest jednocześnie ograniczenie, bądź całkowite wyeliminowanie potrzeby korzystania z urządzeń klimatyzacyjnych, przyczyniające się wprost do redukcji zużycia energii elektrycznej.

#### 5.1.5 OGRANICZENIA PROJEKTOWE

Tworzone rozwiązanie musi sprostać wielu ograniczeniom projektowym. Warunki te zostały podzielone na trzy kategorie w zależności od potrzeby ich uwzględnienia: konieczne, zalecane do spełnienia oraz do rozważenia.

Do ograniczeń koniecznych zostały zaliczone między innymi lokalne uwarunkowania środowiskowe, spośród których wymienić można intensywne promieniowanie słoneczne, brak zachmurzenia, czy ekstremalnie wysokie temperatury i amplitudy temperatur w skali roku i doby.

##### **Warunki konieczne – rozwiązanie:**

- zgodne z założeniami biomimikry;
- wpływające na poprawę komfortu termicznego wewnątrz budynków;
- reagujące na dynamicznie zachodzące zmiany w warunkach środowiskowych;
- dostosowane do lokalnych regulacji i przepisów prawnych;
- wykorzystujące lokalnie dostępne materiały i odnawialne źródła energii;
- posiadające wysoką efektywność energetyczną;
- trwałe i zdadne do ponownego użycia i całkowitego przetworzenia.

##### **Warunki zalecane do spełnienia – rozwiązanie:**

- oparte na systemie zautomatyzowanym;
- generujące niski ślad węglowy;
- stwarzające przyjazny mikroklimat wewnątrz, jak i na zewnątrz budynków;
- efektywne ekonomicznie i generujące niskie koszty utrzymania;
- przystępne cenowo dla przeciętnych użytkowników;
- wykonane z materiałów biodegradowalnych;
- estetyczne – dostosowane do lokalnych tradycji i kultury.

##### **Warunki do rozważenia – rozwiązanie:**

- umożliwiające zmierzenie się z innymi wyzwaniami środowiskowymi;
- możliwe do wdrożenia zarówno w nowym, jak i istniejącym już budownictwie.



### 5.1.6 ASPIRACYJNE CELE PROJEKTOWE

Dyscyplina nauki, jaką jest biomimikra posługuje się konkretnymi narzędziami optymalizacji projektowanych rozwiązań. Jedno z nich stanowią tzw. „Zasady Życia” (ang. *Life's Principles*), które – jako paradygmat projektowy – odzwierciedlają reguły funkcjonowania życia na Ziemi. W *fazie I* stanowią one punkt wyjścia – wzorce projektowe zaczerpnięte z natury, w oparciu o które tworzone są wstępne cele projektowe, jakie spełniać powinno rozwiązanie. Zasady te są również integrowane z procesem w *fazie II* poprzez to, że stanowią one uniwersalne wskazówki (informacje o tym, czego poszukujemy), które wspomagają odkrywanie naturalnych mechanizmów. W *fazie III*, podczas tworzenia, wzorce te służą jako aspiracyjne cele projektowe, do których odnoszą się projektanci. Natomiast w *fazie IV* w trakcie oceniania wykorzystywane są one jako narzędzie do określenia miary osiągniętego celu. Do „Zasad Życia”, w oparciu o które sformułowane zostały aspiracyjne cele projektowe należą:

#### **Cel 01 – Ewolucja w celu przetrwania**

Zamiarem projektowym jest łączenie wykształconych przez lata lokalnych technik pasywnych z nowymi osiągnięciami technologicznymi. Projekt ma być tworzony w oparciu o sprawdzone mechanizmy i rozwiązania oraz wnioski wyciągnięte z wcześniejszych badań.

#### **Cel 02 – Integrowanie rozwoju ze wzrostem**

W założeniu rozwiązanie ma zostać zaprojektowane tak, aby możliwy był jego ciągły wzrost i rozwój. Oznacza to, że w przypadku jakichkolwiek zmian, będzie mogło być ono łatwo zaadaptowane do nowego układu przestrzennego. Zakłada się, że wraz z rozwojem projekt, który ma składać się z jednostek modułowych będzie samoistnie optymalizował i regulował swoją pracę.

#### **Cel 03 – Adaptowanie się do zmiennych warunków**

Celem projektowym jest stworzenie rozwiązania, które będzie reagowało na dynamiczne zmiany zachodzące w skali zarówno doby, jak i roku. Musi ono móc sprostać wysokim temperaturom, znacznym ich amplitudom oraz intensywnemu promieniowaniu słonecznemu. Z założenia projekt ma składać się z kilku form, które będą powielane oraz rozmieszczane niezależnie od siebie, aby w razie jakichkolwiek awarii móc w stanie zapewnić ciągłość działania całego systemu.

#### **Cel 04 – Dostosowanie do lokalnych warunków i reagowanie na nie**

Projektowane rozwiązanie musi być osadzone w kontekście środowiska gorącego i skrajnie suchego. Istotne jest uwzględnienie zachodzących tu cyklicznych zdarzeń pogodowych, a także regularne testowanie systemu w ekstremalnych warunkach i sprawdzanie jego skuteczności. Idealnie byłoby, gdyby tworzone rozwiązanie nie tylko zapewniało optymalny komfort termiczny wewnątrz budynków, ale również wpływało na poprawę miejskiego mikroklimatu.

#### **Cel 05 – Używanie nieszkodliwej dla życia chemii**

Celem projektu jest stworzenie rozwiązania, które będzie składało się z elementów łatwych do demontażu. W ten sposób kolejne części będzie można bez problemu zastąpić, naprawić, ponownie wykorzystać, a ostatecznie przetworzyć bez produkowania szkodliwych produktów ubocznych. Idealnym rozwiązaniem byłoby wykorzystanie w projekcie wody jako nośnika energii cieplnej. Inspiracji można szukać wśród tradycyjnych technik pasywnych regionów pustynnych,

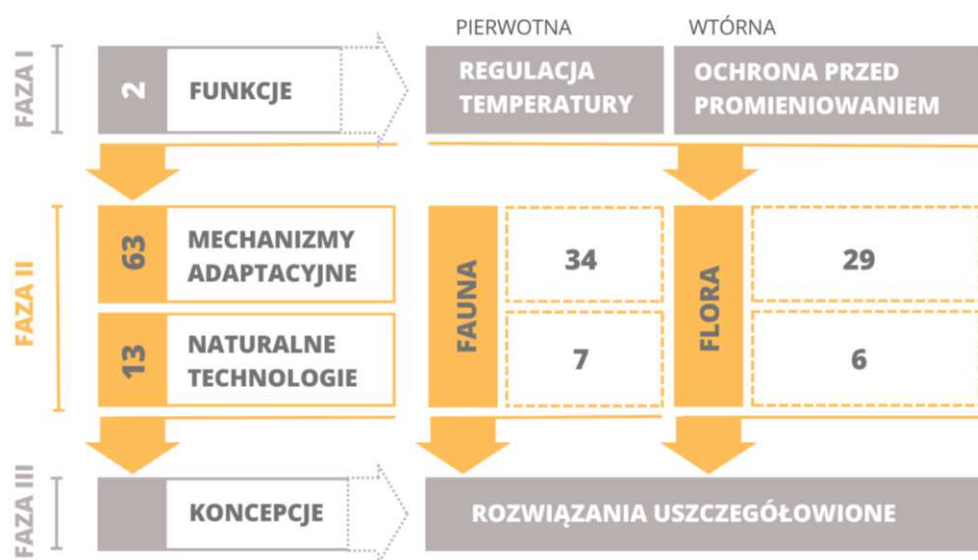
gdzie woda znajdująca się w zbiornikach wodnych lokowanych w centrach dziedzińców w wyniku parowania pozwalała na schłodzenie powietrza, a tym samym miejscowe obniżenie temperatury.

## Cel 06 – Oszczędne i wydajne wykorzystywanie materiałów i energii

Forma projektowanego rozwiązania ma być dostosowana do funkcji. W projekcie poszczególne elementy mają nadawać się do ponownego użycia, a następnie przetworzenia. Idealnie byłoby gdyby rozwiązanie mogło być aplikowane nie tylko w nowo projektowanych budynkach, ale również już istniejących – współczesnych i historycznych. Celem projektu jest ograniczenie, bądź całkowite wyeliminowanie potrzeby korzystania z mechanicznych systemów chłodniczych, a tym samym optymalizowanie kosztów i zużycia energii.

## 5.2 FAZA II | ODKRYWANIE

Przebieg *fazy II*, będącej częścią cyklu projektowego opartego na założeniach biomimikry, zaprezentowano na rysunku 5-1. W trakcie *fazy II* dokonano przeglądu organizmów występujących w przyrodzie – naturalnych modeli – które przez wieki zdołały wykształcić mechanizmy adaptacyjne, pozwalające im na regulowanie temperatury lub unikanie nadmiernego promieniowania słonecznego. Poszukiwania prowadzono przy użyciu portali internetowych AskNature, Blueplanetbiomes oraz OpenLearn, serwisów naukowych (m.in. Google Scholar) oraz wyszukiwania otwartych zasobów naukowych (artykułów i monografii). W trakcie badań zidentyfikowano 63 przykłady organizmów żywych ze świata fauny (34) i flory (29), spośród których 13 najbardziej obiecujących poddano dalszej analizie. Ostatecznie opracowano trzynaście kart, w których podsumowane zostały mechanizmy behawioralne, morfologiczne i fizjologiczne badanych organizmów, które mogą służyć jako inspiracja w *fazie III*: Tworzeniu. Każdy przykład zawiera tło przyrodnicze, opis zasady działania biologicznego mechanizmu i jej ilustrację, a także odkrytą zasadę projektową wraz z jej ilustracją – pozbawione biologicznych sformułowań i zaprezentowane tak, aby mogły stanowić inspirację dla badaczy, rozwiązujących problemy ludzkości.



Rys. 5-1 Schemat prezentujący przebieg fazy II. Opracowanie własne

### 5.2.1 MORFOLOGIA I FIZJOLOGIA ORGANIZMÓW

Ze względu na wykorzystywane w analizie pojęcia, poniżej zostało zamieszczone skrótowe ich objaśnienie, poczynając od budowy organizmów, a następnie strategii ich funkcjonowania:

**Areola** – charakterystyczny dla kaktusów niewielki wytwór morfologiczny – skrócony pęd, z którego wyrastać mogą m.in. ciernie, kwiaty lub nowe rozgałęzienia (196), (197).

**Kutykula** (*łac. cuticula*) – zawierająca wosk warstwa, która pokrywa zewnętrzne ściany komórkowe niektórych części roślin, które stykają się z powietrzem. Warstwa ta chroni roślinę m.in. przed promieniowaniem, uszkodzeniami mechanicznymi oraz zapobiega utracie wody przez parowanie (transpirację) (119).

**Estywacja / sen letni** – jest to stan odrętwienia, w trakcie którego dochodzi do drastycznego zmniejszenia aktywności życiowej, będącego wynikiem braku pokarmu lub wody w okresie suchym i gorącym (119).

**Heterotermia / różnociepność** – mechanizm występujący jedynie u organizmów stałocieplnych (ptaki/ssaki), które mają dużą tolerancję cieplną – zdolność do okresowej ciepłoty ciała, np. poprzez gromadzenie ciepła w ciągu dnia i uwalnianie go nocą lub podczas hibernacji (198).

**Hibernacja** – stan odrętwienia organizmu, będący wynikiem braku pokarmu i znacznym spadkiem temperatury otoczenia (119).

**Przeciwprądowa wymiana ciepła** – mechanizm oparty na zasadzie przeciwprądu, polegający na zwiększaniu wymiany ciepła między cieczami o różnych temperaturach, które płyną w przeciwnych kierunkach (10), (119).

### 5.2.2 ZBIÓR ZIDENTYFIKOWANYCH MECHANIZMÓW ADAPTACYJNYCH

W tej części *fazy II*, będącej częścią procesu projektowania opartego na założeniach biomimikry, dokonano przeglądu organizmów żywych, które wykształciły mechanizmy adaptacyjne, pozwalające im na regulowanie temperatury lub unikanie nadmiernego promieniowania słonecznego. Większość z tych organizmów występuje w regionach, które objęte są klimatem gorącym i skrajnie suchym (BWh – wg klasyfikacji Köppena).

Prezentowana na następnej stronie tabela 5-1 zawiera zbiór 34 gatunków zwierząt, których mechanizmy adaptacyjne umożliwiają im regulowanie temperatury lub unikanie nadmiernego promieniowania słonecznego. Zdjęcia poszczególnych gatunków zwierząt zostały zamieszczone w załączniku nr 4.

Lp.	Nazwa naukowa	Nazwa zwyczajowa	Opis strategii
			<p><b>Legenda:</b> <b>OS</b> – organizm stałocieplny, <b>OZ</b> – organizm zmiennocieplny; <b>AB</b> – adaptacja behawioralna, <b>AF</b> – adaptacja fizjologiczna, <b>AM</b> – adaptacja morfologiczna.</p> <p>Występowanie (biomy): <b>Lm</b> – las monsunowy, <b>Oś</b> – obszar śródziemnomorski, <b>Plt</b> – podzwrotnikowy las tropikalny, <b>Pj</b> – pustynia jałowa, <b>Pp</b> – pustynia półsucha, <b>PSr</b> – pustynia z suchymi roślinami, <b>Sd</b> – sawanna drzewiasta, <b>St</b> – sawanna trawiasta, <b>S</b> – step, <b>Ss</b> – suchy step.</p>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>FAUNA</b>			
1	<i>Atta vollenweideri</i>	Mrówka (ang. Leafcutter ant)	<b>OZ. Plt.</b> Mrówki utrzymują stabilny mikroklimat wewnątrz gniazd dzięki systemowi wentylacji pasywnej. Gniazda te sięgają nawet do 7 m poniżej poziomu terenu. Ich przewietrzanie wspomagane jest przez budowane na powierzchni „wieżyczki”, wzniesione ponad poziom terenu struktury stożkowe. Przepływ powietrza, umożliwiając dokładną kontrolę temperatury, wilgotności oraz wymiany gazowej w gnieździe, zachodzi dzięki różnicy ciśnień między środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym ( <b>AB</b> ) (199).
2	<i>Calendulauda erythrochlamys</i>	Afroskowronek rudy (ang. Dune lark)	<b>OS. Sd.</b> Skowronek reguluje temperaturę ciała dzięki chłodzeniu przez parowanie (ziajanie oraz parowanie z powierzchni skóry – <b>AF</b> ), chowaniu się w cieniu ( <b>AB</b> ) i zastyganiu w bezruchu ( <b>AB</b> ) (200).
3	<i>Camelus dromedarius</i>	Wielbłąd jednogarbny (ang. Dromedary camel)	<b>OS. Pj/PSr.</b> Poza gruczołami potowymi na ciele, które są aktywowane, gdy temperatura ciała osiągnie 40°C, wielbłąd ma także grubą, jasną sierść (na grzbiecie nawet do 10 cm), która odbija promieniowanie słoneczne. Długie, gęste włosie zapewnia cień i pełni funkcję izolacji termicznej, blokując dopływ gorącego powietrza do skóry ( <b>AM</b> ). Część powietrza zatrzymana pomiędzy nim tworzy cienką warstwę izolacyjną, która jest dodatkowo chłodzona przez odparowujący pot ( <b>AF</b> ). Mechanizmy te powodują, że amplituda temperatur między skórą a zewnętrzną powierzchnią sierści może wynieść nawet do 30°C (201), (202).
4	<i>Canis lupus arabs</i>	Wilk arabski (ang. Arabian wolf)	<b>OS. Pj/PSr.</b> Stosunek wielkości uszu wilka arabskiego do reszty ciała jest większy niż u innych gatunków wilków ( <b>AM</b> ). Cyrkulacja ciepłej krwi żyłnej, która odbywa się na ich dużej powierzchni reguluje temperaturę organizmu na drodze radiacyjnej wymiany ciepła z otoczeniem ( <b>AF</b> ). Ponadto wilk korzysta również z chłodzenia przez parowanie ( <b>AF</b> ). Podczas niższych temperatur polega on na przeciwprądowej wymianie ciepła – wydychane powietrze przepływające przez jamę nosową jest stopniowo schładzane, ograniczając utratę wody. Gdy temperatura otoczenia osiąga wartość zbliżoną do temperatury ciała wilka, zaczyna on dyszeć. Rozwarcie pyska powoduje otwarcie zaworu na tylnej ścianie gardła i omijanie nosowego wymiennika ciepła, zwiększając skuteczność chłodzenia (203).

1	2	3	4
5	<i>Cataglyphis bombycina</i>	Saharyjska srebrna mrówka (ang. Saharan silver ant)	<b>OZ. Pj/PSr.</b> Rozległe gniazda mrówek, do których prowadzi kilka oddalonych od siebie wejść, sięgają wilgotnych warstw podłoża – nawet kilka metrów poniżej poziomu terenu. Dzięki temu wewnątrz panuje optymalny mikroklimat ( <b>AB</b> ). Mrówki żerują za dnia, opuszczając gniazdo w ciągu największych upałów ( <b>AB</b> ). Pryzmatyczny kształt włosów mrówki, którymi są gęsto pokryte, umożliwia odbijanie promieniowania słonecznego, a tym samym redukuje ilość absorbowanego ciepła ( <b>AM</b> ). Mechanizmy te pozwalają obniżyć temperaturę ciała mrówki nawet o 5-10°C (204).
6	<i>Cyphochilus</i>	Biały żuk (ang. White beetle)	<b>OZ. Lm.</b> Głowę, ciało i nogi żuka pokrywają cienkie, eliptyczne łuski. Te lekko nachodzące na siebie struktury zbudowane są z gęstej sieci włókien chitynowych, co umożliwia im wydajne odbijanie oraz rozpraszanie wszystkich długości fal światła ( <b>AM</b> ). Efektem takiej budowy jest nieskazitelnie biała barwa łusek (205), (206).
7	<i>Dasycercus cristicauda</i>	Mulgara pręgoogonowa (ang. Crest-tailed mulgara)	<b>OS. PSr.</b> Aktywne nocą ( <b>AB</b> ) mulgary zamieszkują płytkie nory. Za dnia zapadają w krótkotrwały stan odrętwienia, w trakcie którego dochodzi do obniżenia metabolizmu i temperatury ciała zwierzęcia ( <b>AF</b> ) (207).
8	<i>Dipodomys merriami</i>	Szczuroskoczek zmienny (ang. Merriam's kangaroo rat)	<b>OS. PSr.</b> Szczuroskoczki mają wysoką tolerancję termiczną ( <b>AF</b> ). Większość doby spędzają wewnątrz nor na głębokości około 1 m, gdzie temperatura wynosi około 35°C. Zwierzęta uaktywniają się nocą ( <b>AB</b> ), uwalniając zgromadzone w ciele ciepło ( <b>AF</b> ) (208).
9	<i>Disposaurus dorsalis</i>	Legwan pustynny (ang. Desert iguana)	<b>OZ. PSr.</b> Poza pozycjonowaniem ciała, czy częściowym zakopywaniem ( <b>AB</b> ) (209), legwan w pewnym zakresie reguluje również tempo zmian temperatury ciała. Podczas ekspozycji ciała na działanie promieniowania słonecznego rozszerzanie naczyń powoduje jego nagrzewanie, skurcz – miejscowe chłodzenie. Przy wyższych temperaturach legwany rozwierają pysk oraz zwiększają częstotliwość oddechów, obniżając temperaturę mózgu w wyniku konwekcji i parowania ( <b>AF</b> ) (210).
10	<i>Dromaius novaehollandiae</i>	Emu (ang. Emu)	<b>OS. Pp/PSr.</b> Promieniowanie słoneczne zatrzymywane jest na powierzchni piór ptaka, co chroni je przed jego działaniem. Gruba izolacja jaką tworzą, zapobiega transmisji ciepła w stronę skóry ( <b>AM</b> ) (211).
11	<i>Equus quagga</i>	Zebra stepowa (ang. Common zebra)	<b>OS. Sd/St.</b> Czarno-białe ubarwienie zebry powoduje nierównomierne nagrzewanie skóry ( <b>AM</b> ). Różnica wynosząca nawet 10°C pobudza konwekcję i wpływa na zwiększone parowanie z powierzchni skóry, a tym samym obniżenie temperatury ciała (212).
12	<i>Felis margarita</i>	Kot pustynny (ang. Sand cat)	<b>OS. Pj/PSr.</b> Koty pustynne są zwierzętami aktywnymi nocą. Większość dnia spędzają w norach ( <b>AB</b> ). Ich futro zbudowane z keratyny (białka włókienkowego) zapewnia im izolację, zarówno przed ciepłem, jak też chłodem pustyni ( <b>AM</b> ) (213).

1	2	3	4
13	<i>Gazella granti</i>	Gazelka masajska (ang. Grant's gazelle)	<b>OS. Sd/St.</b> Duża tolerancja wzrostu temperatury ciała przez gazelę, wynikająca ze znacznych rozmiarów zwierzęcia, małego stosunku powierzchni do masy ciała ( <b>AM</b> ), pozwala wydłużyć okres nagrzewania organizmu i ograniczyć potrzebę chłodzenia go przez parowanie. Zgromadzone ciepło jest stopniowo uwalniane w nocy i powoli wzrasta w ciągu kolejnego dnia ( <b>AF</b> ) (202).
14	<i>Gazella thomsoni</i>	Gazela Thomsona (ang. Thomson's gazelle)	<b>OS. Sd/St.</b> Gazela reguluje temperaturę ciała wykorzystując mechanizm wybiórczego chłodzenia mózgu oparty o kontrolowany przepływ krwi. Krew kierowana przez sieć tętnic szyjnych (carotid rete), składającą się z małych naczyń tętniczych, dociera do zatok jamistych. Tam przeciwprądowy przepływ chłodniejszej, powracającej z obszaru jamy nosowej krwi żyłnej obniża temperaturę ciepłej krwi tętniczej ( <b>AF</b> ). Tak utrzymywana jest optymalna temperatura mózgowia równa 40,5°C (3,25°C mniej niż w tętnicy szyjnej) (202), (214).
15	<i>Geosciurus inauris</i>	Afrowiórka namibijska (ang. Cape ground squirrel)	<b>OS. Ss/S.</b> Biały ogon afrowiórki o długości równej długości ciała służy jej jako parasol w trakcie żerowania w upalne dni. Stwierdzono, że adaptacja ta pozwala na obniżenie obciążenia cieplnego organizmu nawet o 6-8°C ( <b>AM</b> ). Ponadto zwierzęta w ciągu dnia regularnie chowają się w podziemnych norach, obniżając temperaturę ciała o 1-2°C ( <b>AB</b> ) (215).
16	<i>Isoptera – Nasutitermes triodiae</i>	Termity (ang. Termites)	<b>OZ. Sd.</b> Kopce termitów orientowane są adekwatnie do trajektorii słońca. Celem tego zabiegu jest minimalizacja zysków ciepła w momencie najwyższych temperatur. Kopce składają się z systemu bocznych kanałów połączonych z kanałem centralnym (kominem). Powietrze dostające się poprzez nie wypycha zalegające, gorące powietrze w kierunku komina, skąd wydostaje się ono na zewnątrz ( <b>AB</b> ) (130).
17	<i>Lepus californicus</i>	Zając wielkouchy (ang. Black-tailed jackrabbit)	<b>OS. PSr.</b> Utrzymywanie optymalnej temperatury ciała zająca polega na kontrolowanym przez autonomiczny układ nerwowy krążeniu krwi. W trakcie krążenia dochodzi do zwężania i rozszerzania naczyń krwionośnych, które odpowiednio zapobiegają i sprzyjają utracie ciepła do otoczenia w wyniku promieniowania oraz przewodzenia ( <b>AF</b> ). Ponadto zając ogranicza ekspozycję ciała, chowając się w zacienionych zagłębieniach, gdzie temperatura dna (35°C) może być dwukrotnie niższa niż otaczającego gruntu (70°C) ( <b>AB</b> ) (216), (217).
18	<i>Lepus capensis</i>	Zając płowy (ang. Cape hare)	<b>OS. PSr/Ss.</b> Duże uszy zająca wyposażone są w gęstą sieć powierzchniowych naczyń krwionośnych, których zwężanie i rozszerzanie umożliwia regulację temperatury ciała ( <b>AF</b> ) (218).
19	<i>Loxodonta africana</i>	Słoń afrykański (ang. African bush elephant)	<b>OS. Sd/St.</b> Pomarszczona skóra słonia zapobiega przegrzaniu organizmu: zwiększa powierzchnię parowania w stosunku do objętości ciała ( <b>AM</b> ), przyczynia się do miejscowego samozacieniania ciała oraz umożliwia utrzymywanie wilgoci pomiędzy fałdami, co pozytywnie wpływa na lokalne obniżanie temperatury. Ponadto słonie wykonują ruchy wachlarzowe uszami, aby wymusić ruch powietrza i wspomóc proces uwalniania ciepła ( <b>AB</b> ) (131), (219).

1	2	3	4
20	<i>Macropus rufus</i>	Kangur rudy (ang. Red kangaroo)	<b>OS. Pp/PSr.</b> Termoregulacja ciała kangura zachodzi w wyniku kontrolowanej wymiany ciepła na powierzchni silnie ukrwionego ogona oraz parowania ( <b>AF</b> ), wzmaganej lizaniem przednich łap ( <b>AB</b> ) wyposażonych w zespoloną sieć naczyń powierzchniowych (220). Gęste futro kangura w znacznym zakresie odbija promienie słoneczne, co zapobiega nagrzewaniu ciała. Między włosiem zatrzymywane są natomiast cząsteczki powietrza, które tworzą izolację ( <b>AM</b> ) (211).
21	<i>Oryx leucoryx</i>	Oryks południowy (ang. Arabian oryx)	<b>OS. Pj/PSr.</b> Oryks reguluje temperaturę ciała poprzez heterotermię. W ciągu dnia akumuluje ciepło, które następnie jest stopniowo uwalniane w nocy. Tak ogranicza straty wody, nie musząc chłodzić organizmu poprzez ewaporację. Korzysta on też z mechanizmu wybiórczego chłodzenia mózgu ( <b>AF</b> ). Ponadto w gorące dni oryksy poszukują zacienionych miejsc. Kopytami odślaniają chłodny piasek pod powierzchnią i siadają w zagłębieniach, chłodząc ciało w wyniku przewodzenia ( <b>AB</b> ) (221).
22	<i>Otospermophilus variegatus</i>	Susłouch skalny (ang. Rock squirrel)	<b>OS. PSr/S.</b> Susłouchy w okresach wysokich temperatur zapadają w stan estywacji (zanik aktywności i obniżenie tempa metabolizmu) ( <b>AF</b> ). Zwierzęta te posiadają również sierść, której struktura i optyka włosów umożliwia regulowanie ilości pochłanianego promieniowania. Pomimo że barwa sierści pozostaje bez zmian, zyski ciepła w przypadku sierści zimowej są o 20% większe w porównaniu do szaty letniej ( <b>AM</b> ) (222).
23	<i>Ovis aries</i>	Owca Awassi (ang. Domestic sheep – Awassi)	<b>OS. Pj/PSr.</b> Długie, luźne runo Awassi o zróżnicowanej strukturze i długości włosa pełni funkcję izolacji termicznej. Za dnia przy temperaturze otoczenia 41°C, promienie słoneczne nagrzewają środkową warstwę włosa do temperatury 55,4°C. W tym czasie temperatura powierzchni skóry osiąga 45°C przy zachowanej ciepłocie ciała równej 39°C ( <b>AM</b> ) (223).
24	<i>Ovis aries</i>	Owca Merynos (ang. Domestic sheep – Merino)	<b>OS. Oś.</b> Gęste, puchate runo merynosa zatrzymuje promieniowanie długofalowe na powierzchni włosa. Jednolita struktura włókien o zbliżonej długości zapewnia dobrą izolację termiczną, dając możliwość utrzymania gradientu temperatur sierści przy zachowanej ciepłocie ciała równej 39°C ( <b>AM</b> ) (224).
25	<i>Paraechinus aethiopicus</i>	Piaskojeż etiopski (ang. Desert hedgehog)	<b>OS. Pj/PSr.</b> Jeże większość dnia spędzają w swoich norach albo ukrytych gniazdach, uaktywniając się nocą ( <b>AB</b> ). Gdy na zewnątrz panuje bardzo wysoka temperatura wchodzą one w stan estywacji. Gdy temperatura znacznie obniża się, jeże hibernują. Oba stany polegają na zaniku aktywności i obniżeniu metabolizmu, co zwiększa tolerancję jeży na ekstremalne czynniki środowiskowe ( <b>AF</b> ) (225).
26	<i>Philetairus socius</i>	Tkacz (ang. Sociable weaver)	<b>OS. Pp/S.</b> Wysokie na kilka metrów gniazda budowane przez tkacze składają się z wielu komór, które wraz z pionowymi tunelami wejściowymi o długości co najwyżej 25 cm, znajdują się od spodu. Forma ta sprawia, że wewnątrz utrzymywana jest stabilna temperatura na poziomie około 33°C ( <b>AB</b> ) (129).

1	2	3	4
27	<i>Pterocles coronatus</i>	Stepówka piaskowa (ang. Crowned sandgrouse)	<b>OS. Pj/PSr.</b> Stepówka chłodzi organizm poprzez gwałtowne rozszerzanie worka gardłowego ( <b>AM</b> ) (trzepotanie podgardla <b>AB</b> ), powodujące wzrost prędkości powietrza przepływającego w obrębie worka i jamy policzkowej. Utrata ciepła zachodzi w wyniku konwekcji i parowania. W pierwszym przypadku ciepło przekazywane jest z naczyń krwionośnych znajdujących się blisko ścian worka, w drugim odprowadzane jest ono przez wilgotne błony ( <b>AF</b> ) (226).
28	<i>Struthio camelus</i>	Struś czerwonoskóry (ang. Common ostrich)	<b>OS. St.</b> Długie nagie kończyny i szyja ptaka ( <b>AM</b> ) zapewniają dużą powierzchnię odprowadzania ciepła poprzez konwekcję i promieniowanie. Przy wysokiej temperaturze otoczenia struś wznosi pióra, dzięki czemu zwiększa efekt chłodzenia. Między szczelinami piór dochodzi do przepływu powietrza, co umożliwia konwekcyjne chłodzenie skóry. Podczas wzrostu temperatury ciała ptak unosi długie, rzadko rozmieszczone pióra grzbietowe, zwiększając warstwę izolacyjną. Ważną rolę pełnią również skrzydła ptaka, które w okresie gorącym służą jako element zacieniający skórę tułowia. W nocy, gdy temperatura gwałtownie się obniża, strusie składają skrzydła blisko tułowia, chowają nogi pod ciało oraz spłaszczają i zazębiają pióra grzbietowe ( <b>AB</b> ). Dzięki temu tworzą izolację, która pozwala im na utrzymanie optymalnej temperatury ciała w zakresie 38-39°C (227).
29	<i>Tarentola mauritanica</i>	Gekon murowy (ang. Common wall gecko)	<b>OZ. Oś.</b> Ciało gekona nagrzewa się wolniej niż traci ciepło, dzięki czemu czas aktywności jaszczurki jest wydłużony (228). W ciągu dnia jej skóra jest niemal całkowicie czarna. Nocą zaś blednie (229), co może mieć powiązanie z zapobieganiem nadmiernej utracie ciepła w wyniku promieniowania ( <b>AF</b> ).
30	<i>Uma scoparia</i>	Jaszczurka zwinka Mojave (ang. Mojave fringe-toed lizard)	<b>OZ. PSr.</b> Ciało Umy może nagrzewać się do temperatur rzędu 47,1-48,7°C (230). Jej schronienie przed ekstremalnymi temperaturami stanowi piasek. Latem, gdy temperatura gruntu sięga ponad 40°C jaszczurka zakopuje się pod jego powierzchnią ( <b>AB</b> ). Zimą z uwagi na przymrozki hibernuje ona na głębokości 30 cm ( <b>AF</b> ).
31	<i>Urosaurus ornatus</i>	Legwan (ang. Common tree lizard)	<b>OZ. PSr/SS.</b> W reakcji na zmiany temperatury dochodzi do przeorganizowania zawierających melanine, niebieskich komórek pigmentowych legwana. Ich rozproszenie powoduje ciemnienie skóry, podczas gdy ich ponowne gromadzenie prowadzi do jej rozjaśnienia, a tym samym odbijania większej ilości światła i wspomaganie chłodzenia organizmu ( <b>AF</b> ) (231).
32	<i>Uta stansburiana</i>	Uta plamoboka (ang. Common side-blotched lizard)	<b>OZ. PSr/S.</b> Uta jako organizm zmiennocieplny może nagrzać swoje ciało do temperatury 44,9-45,6°C (230). W tym celu orientuje swoje ciało pod kątem prostym do promieni słonecznych. Spłaszczanie ciała dodatkowo zwiększa ekspozycję. W celu uniknięcia przegrzania organizmu Uta przenosi się w cień skał lub zarośli ( <b>AB</b> ). Stosując te strategie, jaszczurka utrzymuje ciepłotę ciała na poziomie 36-38°C.



1	2	3	4
33	<i>Vulpes macrotis</i>	Lis długouchy (ang. Kit fox)	<b>OS. PSr/Ss.</b> Lis posiada długie uszy, sięgające nawet ponad 9 cm ( <b>AM</b> ). Takie rozmiary uszu zapewniają zwiększoną powierzchnię, dzięki której może on efektywnie chłodzić swoje ciało (232).
34	<i>Vulpes zerda</i>	Fenek pustynny (ang. Fennec fox)	<b>OS. Pj/PSr.</b> Fenek posiada duże uszy dzięki którym może efektywnie chłodzić ciało. Poza tym jego ciało pokryte jest jasną, grubą sierścią, dzięki czemu odbija ono więcej promieniowania słonecznego ( <b>AM</b> ) (233).

**Tab. 5-1** Zestawienie zwierząt zidentyfikowanych podczas fazy II: odkrywania, które wykształciły mechanizmy adaptacyjne, pozwalające im na regulowanie temperatury lub unikanie nadmiernego promieniowania słonecznego. Opracowanie własne.

Tabela 5-2 zawiera zbiór 29 gatunków roślin, których mechanizmy adaptacyjne umożliwiają im regulowanie temperatury lub unikanie nadmiernego promieniowania słonecznego. Zdjęcia poszczególnych gatunków roślin znajdują się w załączniku nr 5.

L.p.	Nazwa naukowa	Nazwa zwyczajowa	Opis strategii
<p><b>Legenda:</b> <b>AB</b> – adaptacja behawioralna, <b>AF</b> – adaptacja fizjologiczna, <b>AM</b> – adaptacja morfologiczna.</p> <p>Występowanie (biomy): <b>LPs</b> – las podzwrotnikowy suchy, <b>Lt</b> – las tropikalny, <b>Pp</b> – pustynia półsucha, <b>PSr</b> – suchorośla pustynne, <b>Sd</b> – sawanna drzewiasta, <b>St</b> – sawanna trawiasta, <b>S</b> – step, <b>Ss</b> – suchy step, <b>Ta</b> – tundra alpejska.</p>			
1	2	3	4
<b>FLORA</b>			
1	<i>Adansonia digitata</i>	Baobab afrykański (ang. African baobab)	<b>Sd/St.</b> Baobab magazynuje znaczne ilości wody w gąbczastym pniu i gałęziach pokrytych grubą, odbijającą światło korą, która chroni drzewo przed pożarami i promieniowaniem słonecznym. Zmiany w ilości zgromadzonego płynu wpływają na rozszerzanie, bądź kurczenie pnia nawet o 2-3 cm ( <b>AF</b> ). Mały rozmiar liści zapobiega utracie wody, ograniczając transpirację ( <b>AM</b> ). W celu dalszej redukcji strat w porze suchej drzewo zrzuca liście ( <b>AB</b> ) (234).
2	<i>Agave americana</i>	Agawa stuletnia (ang. Century plant)	<b>PSr.</b> Agawa ma duże, mięsiste liście, w których gromadzi wodę. Pokryte są one woskową warstwą (kutykulą) o właściwościach hydrofobowych, która chroni roślinę przed promieniowaniem i zapobiega utracie wody, ograniczając transpirację ( <b>AM</b> ) (235).
3	<i>Aloidendron dichotomum</i>	Drzewo kołczanowe (ang. Quiver tree)	<b>PSr.</b> Drzewo kołczanowe ma grube, mięsiste liście, które rosną w rozecie na zwieńczeniu każdej z wyniesionych wysoko ponad poziom gruntu gałęzi, zacinając niższe partie rośliny ( <b>AM</b> ). Żółta kora gałęzi pokryta jest cienką warstwą białej, proszkowatej substancji, która odbija promienie słoneczne, chroniąc roślinę. Zarówno gałęzie, jak i pień zbudowane są z miękkiej tkanki, która umożliwia zatrzymywanie dużej ilości wody ( <b>AF</b> ) (236).

1	2	3	4
4	<i>Artemisia tridentata</i>	Sagebrush (ang. Common sagebrush)	<b>Ss.</b> Sagebrush jest rośliną o okrągłym pokroju z prostymi, sztywnymi łodygami gęsto pokrytymi drobnymi liśćmi. Jasna barwa liści powoduje, że ich powierzchnia nagrzewa się w mniejszym stopniu. Efekt ten jest spotęgowany dzięki małym, srebrnym włoskom pokrywającym liście, które odbijają promieniowanie słoneczne ( <b>AM</b> ) (237).
5	<i>Atriplex polycarpa</i>	Łoboda (ang. Desert saltbush)	<b>S.</b> Roślina, pobierając wodę z zasolonego gruntu, usuwa jej nadmiar przez osadzanie kryształków soli w pęcherzykach na powierzchni swoich liści. Kryształy te pozwalają wyłapywać wilgoć z powietrza (238). Ponadto tworzą one łuski na liściach i łodydze, umożliwiając odbijanie promieni słonecznych ( <b>AF</b> ). W przypadku ekstremalnej suszy, krzew zrzuca wszystkie liście ( <b>AB</b> ), aby ograniczyć powierzchnię parowania a przy tym usunąć nadmiar soli (239).
6	<i>Beaucarnea recurvata</i>	Nolina wygięta (ang. Ponytail palm)	<b>LPS/S.</b> Nolina tworzy pękaty, silnie zgrubiony u dołu pień, który pełni rolę magazynu wody ( <b>AF</b> ). Posiada ona również cienkie, długie liście, formujące pióropusz (240), które zacieniają roślinę ( <b>AM</b> ).
7	<i>Carnegiea gigantea</i>	Karnegia olbrzymia (ang. Saguaro)	<b>PSr.</b> Karnegia reguluje temperaturę wewnętrzną dzięki wodzie, która stanowi ponad 90% składu organizmu. Za dnia duża zdolność wody do akumulowania ciepła zapobiega nagraniu rośliny do temperatur zewnętrznych. W nocy natomiast zgromadzone ciepło jest stopniowo uwalniane, chroniąc tkanki przed przemrożeniem ( <b>AF</b> ). Cylindryczna łodyga kaktusa pokryta jest woskową powłoką (kutykulą), która odbija promienie słoneczne i ogranicza czynne parowanie wody. Ważną rolę pełnią też żebra i kolce, które utrudniają transpirację, hamując przepływ powietrza, odbijają promienie słoneczne i częściowo zacieniają łodygę ( <b>AM</b> ) (241).
8	<i>Ceanothus crassifolius</i>	Prusznik (ang. Hoaryleaf ceanothus)	<b>S.</b> Prusznik orientuje swoje liście w zależności od dostępności wody w danym okresie. W trakcie pory suchej liście są ustawione niemal pionowo. Zimą i wczesną wiosną, gdy panują niższe temperatury a dostępność wody jest większa, ułożenie liści zmienia się na bardziej poziome, co pozwala zwiększyć absorpcję energii słonecznej ( <b>AB</b> ). (242).
9	<i>Cephalocereus senilis</i>	Starzec (ang. Old man cactus)	<b>PSr.</b> Cylindryczny kształt łodygi kaktusa pozwala zachować sporą objętość w stosunku do mniejszej powierzchni wyeksponowanej na promieniowanie słoneczne. Jego łodygę pokrywa warstwa wosku (kutykula), która odbija promienie słoneczne i ogranicza transpirację. Kaktus ma też długie, siwe ciernie, które wyglądem przypominają włosy. Ich zadaniem jest zacienianie rośliny, odbijanie promieni słonecznych, jak też chronienie przed działaniem niskich temperatur ( <b>AF</b> ) (243).
10	<i>Crassula ovata</i>	Grubosz owalny (ang. Jade plant)	<b>S.</b> Grubosz owalny ma drobne, mięsiste liście pokryte powłoką woskową ( <b>AM</b> ), która odbija promieniowanie i ogranicza transpirację (241). Rosną one na masywnych, gąbczastych łodygach, w których gromadzona jest woda. Grubiejące łodygi pokrywa peryderma, składająca się z hydrofobowego korka, która chroni roślinę przed utratą wody (244). Gdy roślina poddana jest zbyt intensywnemu działaniu promieni słonecznych zaczyna wytwarzać pigmenty (karotenoidy), które powodują zmianę barwy liści na żółtą ( <b>AF</b> ).

1	2	3	4
11	<i>Cylindropuntia bigelovii</i>	Cylindropuncja (ang. Teddy bear cholla)	<b>PSr.</b> Roślina posiada pionowy pień z licznymi bocznymi gałęziami. Starsze, niżej położone gałęzie obumierają i odpadają ( <b>AB</b> ). Młode zaś niemal całkowicie osłaniają łodygę (245). Gałęzie są gęsto pokryte srebrzystobiałymi kolcami, które odbijają promienie słoneczne, zapewniają cień oraz zaburzają przepływ powietrza, ograniczając transpirację ( <b>AM</b> ) (246).
12	<i>Dioscorea elephantipes</i>	Pochrzyn słoniowy (ang. Hottentot bread)	<b>S.</b> Pochrzyn rozwija pod ziemią ogromną bulwę, która może ważyć nawet 300 kg. Bulwa, ukryta przed bezpośrednim działaniem promieni słonecznych, służy jako podziemny magazyn wody (236). W części nadziemnej roślina wypuszcza pojedyncze pnące o drobnym ulistnieniu, redukując tym samym powierzchnię wyeksponowaną na działanie promieni słonecznych ( <b>AM</b> ). W okresie dotkliwych suszy pochrzyn zrzuca liście aby ograniczyć czynne parowanie wody i oszczędzać energię ( <b>AB</b> ).
13	<i>Echinocactus grusonii</i>	Złota beczka (ang. Golden barrel cactus)	<b>PSr.</b> Cylindryczny kształt kaktusa zapewnia mu maksymalną objętość do magazynowania wody przy zachowaniu minimalnej powierzchni wyeksponowanej na działanie promieni słonecznych. Jego łodygę pokrywa gruba woskowa powłoka (kutykula), która ogranicza czynne parowanie wody. Kaktus ma też liczne długie, równomiernie rozłożone kolce o jasnej barwie, które odbijają promienie słoneczne, zapewniają cień roślinie oraz utrudniają przepływ powietrza nad jej powierzchnią ( <b>AM</b> ) (243).
14	<i>Echinocereus rigidissimus</i>	Kaktus tęczy (ang. Arizona rainbow cactus)	
15	<i>Encelia farinosa</i>	Brittle bush (ang. Brittle bush)	<b>S.</b> Roślina z rodziny astrowatych posiada drobne liście gęsto pokryte krótkimi srebrnymi włoskami. Włoski te zapewniają ochronę przed mrozami, odbijają promieniowanie słoneczne poprzez co wpływają na obniżenie temperatury powierzchni liści, jak też umożliwiają wyłapywanie wilgoci z powietrza ( <b>AM</b> ) (247).
16	<i>Euphorbia abysynica</i>	Wilczomlec (ang. Desert candle)	<b>PSr.</b> Dojrzała roślina składa się z głównego zdrewniałego pnia oraz odchodzących od niego zielonych łodyg o żebrowej budowie. Wilczomlec ma drobne, owalne liście, które wypuszcza jedynie na żebrach nowych pędów ( <b>AM</b> ). Liście te zrzuca w czasie pory suchej, co pozwala ograniczyć mu utratę wody ( <b>AB</b> ) (248).
17	<i>Ferocactus wislizeni</i>	Ferokaktus (ang. Candybarrel cactus)	<b>PSr.</b> Sferyczny kształt kaktusa zapewnia mu maksymalną objętość do magazynowania wody przy zachowaniu minimalnej powierzchni wyeksponowanej na działanie promieni słonecznych. Jego łodygę pokrywa warstwą wosku, która ogranicza czynne parowanie. Łodyga ta rozszerza się i kurczy zależnie od ilości zmagazynowanej wody ( <b>AM</b> ). W okresie suszy obkurczające się do wewnątrz żebra znacznie zmniejszają powierzchnię wystawioną na działanie promieni słonecznych ( <b>AF</b> ). W dodatku kaktus ten rośnie pod kątem ( <b>AB</b> ). Przechyla się w stronę południową, zacinając w ten sposób łodygę. Ma też różnej długości kolce, których funkcją jest odbijanie promieniowania, zacinanie łodygi oraz zakłócanie przepływu powietrza, spowalniające utratę wody ( <b>AM</b> ) (249).
18	<i>Fouquieria columnaris</i>	Boojum (ang. Boojum tree)	<b>PSr.</b> Boojum ma jeden pień o średnicy 50 cm, z którego wyrastają cienkie cierniste rozgałęzienia pokryte małymi, gruboszowatymi liśćmi ( <b>AM</b> ), które zrzuca w trakcie pory suchej i zimą. Dzięki temu redukuje czynne parowanie wody oraz ogranicza powierzchnię eksponowaną na działanie promieni słonecznych ( <b>AF</b> ) (245).

1	2	3	4
19	<i>Fouquieria splendens</i>	Okotijo (ang. Ocotillo)	<b>PSr.</b> Okotijo składa się z licznych pni o średnicy do 5 cm, z których wyrastają cienkie cierniste rozgałęzienia pokryte drobnymi, gruboszowatymi liśćmi ( <b>AM</b> ). Drzewo zrzuca liście w trakcie pory suchej i zimą, aby zredukować czynne parowanie wody oraz ograniczyć powierzchnię wystawioną na bezpośrednie działanie promieniowania słonecznego ( <b>AF</b> ) (245), (250).
20	<i>Leontopodium nivale</i>	Szarotka alpejska (ang. Edelweiss)	<b>Ta.</b> Szarotka ma włoski okrywające skórę jej liści i łodyg zwaną kutnerem. Gęsto rozmieszczone, martwe włoski wypełnione powietrzem nadają roślinie białosrebrzystej barwy ( <b>AM</b> ). Rolą tej adaptacji jest zabezpieczanie rośliny przed nadmiernym nagrzewaniem powierzchni organizmu i parowaniem (251).
21	<i>Licuala ramsayi</i>	Wachlarzownica (ang. Australian fan palm)	<b>Lt.</b> Liście wachlarzownicy mają pokaźne rozmiary, co zapewnia im dużą powierzchnię absorpcji promieniowania słonecznego. Dzięki temu, że liść podzielony jest na segmenty, wzrost temperatury liścia znajdującego się w pełnym słońcu ograniczony jest do 40-45°C. Jest to możliwe, gdyż poszczególne segmenty są przechylone tak, aby pomiędzy zapewnić swobodny przepływ powietrza, a w wyniku tego utratę ciepła ( <b>AM</b> ) (252).
22	<i>Olneya tesota</i>	Drzewo żelazne (ang. Desert ironwood)	<b>PSr.</b> Drzewo żelazne wyrasta zwykle z kilku pni. Kora młodych drzew jest szara i gładka, z wiekiem zaś staje się pofałdowana. Wpływa to na powstawanie lokalnych zacienień, które stymulują zjawisko konwekcji, umożliwiając obniżenie temperatury powierzchni kory. Podobnie okrągły kształt pni i gałęzi sprawia, że pewne obszary zawsze znajdują się w cieniu. Drzewo ma również niewielkie liście pokryte drobnymi włoskami, których rolą jest odbijanie promieni słonecznych ( <b>AM</b> ). W porze suchej drzewo zrzuca część liści ( <b>AB</b> ), aby zapobiec nadmiernej utracie wody (245). Pozostałe tworzą natomiast baldachim, który zapewnia roślinie ochronę przed intensywnym działaniem promieni słonecznych.
23	<i>Parkinsonia florida</i>	Palo verde (ang. Blue palo verde)	<b>PSr.</b> Drzewo palo verde ma drobne liście, redukując w ten sposób powierzchnię wystawioną na intensywne działanie promieni słonecznych ( <b>AM</b> ). W porze suchej lub w czasie chłódów drzewo zrzuca liście ( <b>AB</b> ), ograniczając transpirację. Liście opadają pozostawiając ogonki, które wraz z zieloną korą odpowiadają za przeprowadzanie procesu fotosyntezy ( <b>AF</b> ) (253).
24	<i>Parkinsonia microphylla</i>	Palo verde (ang. Littleleaf palo verde)	
25	<i>Prosopis velutina</i>	Jadłoszyn (ang. Velvet mesquite)	<b>PSr.</b> Jadłoszyn ma drobne liście, ograniczając w ten sposób powierzchnię parowania. Zarówno one, jak i młode strąki pokryte są małymi włoskami, których zadaniem jest odbijanie promieni słonecznych ( <b>AM</b> ). Liście jadłoszynu tworzą baldachim, dający cień, dzięki któremu temperatura gruntu pod drzewem jest niższa niż otaczającej pustyni. Tworzy to idealne schronienie dla zwierząt i roślin innych gatunków. W celu oszczędzania energii w okresie zimowym roślina zrzuca liście. Część z nich opada również podczas dotkliwych suszy ( <b>AB</b> ), aby ograniczyć czynne parowanie wody (254).

1	2	3	4
26	<i>Simmondsia chinensis</i>	Simondsja kalifornijska (ang. Jojoba)	<b>PSr.</b> Simondsja ma małe, sinozielone liście pokryte kutykulą ( <b>AM</b> ), które orientowane są tak, aby ograniczać ich ekspozycję na bezpośrednie działanie promieni słonecznych (255). Adaptacja ta umożliwia roślinie optymalizowanie ilości ciepła gromadzonego w ciągu dnia ( <b>AB</b> ) (256).
27	<i>Stenocereus thurberi</i>	Kaktus organowy (ang. Organ pipe cactus)	<b>PSr.</b> Kaktus organowy ma wiele kolumnowych łodyg, wyrastających z jednej podstawy, które odpowiedzialne są za magazynowanie wody. Łodygi te pokryte są woskową powłoką (kutykulą), ograniczającą czynne parowanie wody, oraz kolcami, które odbijają promieniowanie słoneczne, jak też zapewniają cień roślinie ( <b>AM</b> ) (257).
28	<i>Xanthorrhoea australis</i>	Żółtak (ang. Grass tree)	<b>Pp.</b> Żółtak ma bardzo długie, wąskie liście, przypominające trawę, które zrzuca każdego roku ( <b>AB</b> ). Za każdym razem nowa rozeta liści wyrasta coraz wyżej u podstawy korony. Stąd rdzeń rośliny tworzą włókna otoczone pierścieniami zbitych podstaw liści sklejoną gumą. Struktura ta zapewnia roślinie skuteczną izolację cieplną oraz ochronę przed pożarami ( <b>AM</b> ) (236).
29	<i>Yucca brevifolia</i>	Juka krótkolistna (ang. Joshua tree)	<b>PSr.</b> Juka ma dwa systemy korzeniowe ( <b>AM</b> ). Jeden sięga głęboko pod ziemię i rozwija bulwy, w których magazynowane są nadwyżki wody. Drugi – płytki – tworzą korzenie powietrzne skierowane do góry. Ich zadaniem jest absorbowanie wilgoci z powietrza. Poza bulwami, woda magazynowana jest również w włóknistym pniu i w długich, wąskich liściach, rosnących w rozetach. Liście te pokrywa woskowa powłoka (kutykula), która odbija promienie słoneczne i ogranicza czynne parowanie wody ( <b>AF</b> ) (258).

**Tab. 5-2** Zestawienie roślin zidentyfikowanych podczas fazy II: odkrywania, które wykształciły mechanizmy adaptacyjne, pozwalające im na regulowanie temperatury lub unikanie nadmiernego promieniowania słonecznego. Oprac. własne.

### 5.2.3 TAKSONOMIA

		<i>Atta vollenweideri</i>	<i>Calendulauda erythrochlamys</i>	<i>Camelus dromedarius</i>	<i>Canis lupus arabs</i>	<i>Cataglyphis bombycina</i>	<i>Cyphochilus</i>	<i>Dasyercus cristicauda</i>	<i>Dipodomys merriami</i>	<i>Disposaurus dorsalis</i>	<i>Dromaius novaehollandiae</i>	<i>Equus quagga</i>	<i>Felis margarita</i>	<i>Gazella granti</i>	<i>Gazella thomsoni</i>	<i>Geosciurus inauris</i>
zbiór	fauna	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	biom*	Plt	Sd	Pj/PSr	Pj/PSr	Pj/PSr	Lm	PSr	PSr	PSr	Pp/PSr	Sd/St	Pj/PSr	Sd/St	Sd/St	Ss/S
zbiór	stałocieplne		•	•	•			•	•		•	•	•	•	•	•
	zmiennocieplne	•				•	•			•						
<b>adaptacje behawioralne</b>																
tryb	nocny	•						•	•				•			
	dzienny	•	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
schronienie	nadziemne															
	rodzaj															
	podziemne	•				•		•	•	•			•			•
zachowanie	rodzaj	gniaz.				gniaz.		nory	nory	nory			nory			nory
	chowanie się w cieniu		•											•		•
	zacienianie			•							•					
	pozycjonowanie ciała								•	•	•					
	chłodzenie wodą															
	stan odrętwienia							•								
	sen letni															
<b>adaptacje morfologiczne</b>																
cechy strukturalne	budowa - wpływ na termoregulację	•		•	•	•					•	•	•	•	•	•
	budowa - odbijanie promieni słonecznych			•		•	•				•					
	budowa - wpływ na samozacienianie			•		•	•				•					•
	budowa - wpływ na przepływ powietrza	•		•							•	•				
	warstwa izolacyjna	tunele		•							•					
	jasna barwa	•	•	•	•		•			•			•	•	•	•
	pow. ciała/objętości**	6	3	2	3	6	6	6	6	3	6	2	3	2	2	6
<b>adaptacje fizjologiczne</b>																
cechy funkcjonalne	ewaporacja		•	•	•					•	•	•	•			•
	zmiana ubarwienia		ziaz.	pot	dysz.					dysz.	ziaz.	pot	pot			pot
	powolne uwalnianie ciepła nocą			•						•					•	
	sterowanie przepływem krwi			•						•			•	•	•	
			rete										rete	rete		

W tabeli zastosowano następujące skróty: dysz. – dyszenie, gniaz. – gniazdo, konstr. – konstrukcja, liz. – lizanie, rete –

\*Występowanie: Lm - las monsunowy, Os – obszar śródziemnomorski, Plt – podzwrotnikowy las tropikalny, Pj – pustynia

\*\*Ze względu na stosunek powierzchni ciała do objętości (6, 3, bądź 2) zwierzęta pustynne dzieli się odpowiednio na trzy grupy: unikające utraty wody (ang. evaders), odparowujące wodę (ang. evaporators) lub wytrzymujące utratę wody (ang. endurers). Pierwsza grupa (6) to małe zwierzęta, które nagrzewają się i tracą ciepło szybciej niż większe organizmy. Strategie tych zwierząt polegają na unikaniu przegrzania ciała oraz ograniczaniu potrzeby chłodzenia organizmu przez

	<i>Isoptera</i>	<i>Lepus californicus</i>	<i>Lepus capensis</i>	<i>Loxodonta africana</i>	<i>Macropus rufus</i>	<i>Oryx leucoryx</i>	<i>Otospermophilus variegatus</i>	<i>Ovis aries, Awassi</i>	<i>Ovis aries, Merynos</i>	<i>Paraechinus aethiopicus</i>	<i>Philetarius socius</i>	<i>Pterocles coronatus</i>	<i>Struthio camelus</i>	<i>Tarentola mauritanica</i>	<i>Uma scoparia</i>	<i>Urosaurus ornatus</i>	<i>Uta stansburiana</i>	<i>Vulpes macrotis</i>	<i>Vulpes zerda</i>	
	Sd	PSr	PSr/Ss	Sd/St	Pp/PSr	Pj/PSr	PSr/S	Pj/PSr	Oś	Pj/PSr	Pp/S	Pj/PSr	St	Oś	PSr	PSr/Ss	PSr/S	PSr/Ss	Pj/PSr	
	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•						•	•
	•													•	•	•	•			
		•		•	•		•			•				•					•	•
	•		•	•		•		•	•		•	•	•	•	•	•	•			
	•										gniaz.									
kopce																				
		•	•		•	•	•			•					•			•	•	•
		nory				nory				nory					piasek			nory	nory	
	•	•		•	•			•	•		•	•	•		•	•	•			•
				•									•	•			•			
							•			•					•	•				
		•	•	•	•		•	•	•		•	•	•		•		•	•	•	•
	uszy	uszy		łapy		sierść	futro	futro		konstr.	worki	pióra			komórki		uszy	uszy		
							•	•				•			•			•	•	
							runo	runo				pióra			komórki			•	sierść	
orient.			•				•	•		•		•								
tunele			•				•	•			•	•								
			uszy				runo	runo			•	•								
	•	•		•	•		•	•				•								
6	3	3	2	2	2	2	2	2	6	3	3	6	6	6	2	6	3	3		
	•	•		•	•		•	•		•	•	•						•	•	
	dysz.	dysz.		liz.	pot		pot	pot		ziaz.	drganie	ziaz.						dysz.	dysz.	
			•		•									•		•				
	•	•	•	•	•		•	•						•	•	•	•	•	•	
	rete	rete			rete		rete	rete												

*carotid rete* (sieć dziwna), *ziaz.* – ziajanie.

*jałowa*, *PSr* – pustynie z suchymi roślinami, *Sd* – sawanna drzewiasta, *St* – sawanna trawiasta, *S* – step, *Ss* – suchy step.

odparowanie wody. Do drugiej grupy (3) zaliczane są gatunki, które w znacznej mierze utrzymują optymalną temperaturę ciała dzięki ewaporacji. Zwierzęta te są tym samym uzależnione od poboru wody. Trzecia grupa (2) składa się z bardzo dużych zwierząt, które z powodu swoich rozmiarów nie są w stanie ukryć się pod ziemią, a tym samym przez całą dobę wystawione są na działanie czynników zewnętrznych.

Tab. 5-3 Adaptacje poszczególnych badanych organizmów ze świata fauny. Opracowanie własne.

		<i>Adansonia digitata</i>	<i>Agave americana</i>	<i>Aloidendron dichotomum</i>	<i>Artemisia tridentata</i>	<i>Atriplex polycarpa</i>	<i>Beaucarnea recurvata</i>	<i>Carnegiea gigantea</i>	<i>Ceanothus crassifolius</i>	<i>Cephalocereus senilis</i>	<i>Crassula ovata</i>	<i>Cylindropuntia bigelovii</i>	<i>Dioscorea elephantipes</i>
zbiór	flora	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	biom*	Sd/St	PSr	PSr	Ss	S	LPs/S	PSr	S	PSr	S	PSr	S
<b>adaptacje behawioralne</b>													
zachowanie	opadanie organów	•			•	•						•	•
	rodzaj organu	liście			liście	liście						gałęzie	liście
	samozaćnianie		•	•	•		•	•	•	•	•	•	
	orientacja w stosunku do kąta pad. prom. słon.								•				
								liście					
<b>adaptacje morfologiczne</b>													
cechy strukturalne	budowa - wpływ na termoregulację	•			•	•	•	•	•	•	•	•	•
		liście			włoski	liście	kora	żebra	liście	włosy	liście	kolce	pnącze
	budowa - odbijanie promieni słonecznych	•	•	•	•	•		•	•	•		•	
		kora	wosk	gałęzie	włoski	łuski		wosk	liście	włosy		kolce	
	budowa - wpływ na samozaćnianie	•		•	•		•	•	•	•	•	•	
		liście		liście	liście		liście	żebra	liście	włosy	liście	kolce	
	budowa - wpływ na przepływ powietrza				•			•		•			•
					liście			kolce		włosy			kolce
	warstwa izolacyjna	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		kora	wosk	kora	włoski	łuski	kora	wosk	wosk	włosy	wosk		
jasna barwa		•	•	•	•		•		•	•	•		
pow. org./objętości							<	<		<		<	
nadziemne mag. wody	•	•	•				•	•	•	•	•		
podziemne mag. wody												•	
<b>adaptacje fizjologiczne</b>													
cechy funkcjonalne	fotosynteza CAM**	•	•					•		•	•	•	
	fotosynteza C <sub>4</sub>					•							
	fotosynteza C <sub>3</sub>			•	•		•		•				•
	ograniczona transpiracja	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	kurczenie i rozszerzanie	•						•			•		
	część organizmu	pień						łodyga			liście		
	fotosynteza poza liśćmi							•		•		•	
	zmiana barwy										•		
	powłoka odbijająca promieniowanie słon.			•									
				proszek									
magazynowanie wody	•	•	•			•	•		•	•	•	•	
rodzaj zbiornika	pień	liście	liście			bulwa	pień		łodyga	łodyga	łodyga	bulwa	

\*Występowanie wg biomów: LPs - las podzwrotnikowy suchy, Lt – las tropikalny, Pp – pustynia półsucha, PSr –

\*\*Rośliny CAM (ang. crassulacean acid metabolism) w przeciwieństwie do roślin C<sub>3</sub>, do których należy większość gatunków roślin, wykształciły fotosyntetyczną adaptację umożliwiającą redukcję fotooddychania. Adaptacja ta, polegająca na kwasowym metabolizmie węgla, pozwala na prowadzenie oszczędnej gospodarki wodnej. W tym



<i>Echinocactus grusonii</i>	<i>Echinocereus rigidissimus</i>	<i>Encelia farinosa</i>	<i>Euphorbia abyssinica</i>	<i>Ferocactus wislizeni</i>	<i>Fouquieria columnaris</i>	<i>Fouquieria splendens</i>	<i>Leontopodium nivale</i>	<i>Licuala ramsayi</i>	<i>Olneya tesota</i>	<i>Parkinsonia florida</i>	<i>Parkinsonia microphylla</i>	<i>Prosopis velutina</i>	<i>Simmondsia chinensis</i>	<i>Stenocereus thurberi</i>	<i>Xanthorrhoea australis</i>	<i>Yucca brevifolia</i>
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
PSr	PSr	S	PSr	PSr	PSr	PSr	Ta	Lt	PSr	PSr	PSr	PSr	PSr	PSr	Pp	PSr
			•		•	•			•	•	•	•			•	
			liście		liście	liście			liście	liście	liście	liście			liście	
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
				•									•			
				łodyga									liście			
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•	•	•	•
zebra	zebra	włoski	zebra	zebra	liście	liście	kutner	liście	liście			liście	liście	zebra	liście	
•	•	•		•			•	•	•			•		•		•
wosk	wosk	włoski		kolce			kutner		włoski			włoski		wosk		wosk
•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•
kolce	kolce	liście		zebra	liście	liście	liście		liście	liście	liście	liście	liście	zebra	liście	
•	•			•				•	•					•		
kolce	kolce			kolce				liście	kora					kolce		
•	•	•	•	•					•			•		•	•	•
wosk	wosk	włoski	wosk	wosk					kora			włoski		wosk	guma	wosk
•	•	•		•					•			•		•		•
<	<			<												
•	•		•	•										•		•
																•
•	•		•	•										•		
		•			•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	łodyga			łodyga									liście			
•	•		•	•	•	•				•	•	•		•		
													•			
•	•		•	•										•		•
łodyga	łodyga		pień	łodyga										pień		pień

suchorośla pustynne, Sd – sawanna drzewiasta, St – sawanna trawiasta, S – step, Ss – suchy step, Ta – tundra alpejska.

Tab. 5-4 Adaptacje poszczególnych badanych organizmów ze świata flory. Opracowanie własne.

## 5.2.4 NATURALNE WZORCE PROJEKTOWE

W tej części *fazy II* 13 najbardziej obiecujących organizmów (7 gatunków zwierząt, 6 gatunków roślin), spełniających zdefiniowane w *fazie I* funkcje, poddano dalszej analizie. Na podstawie przeprowadzonych badań, w oparciu o zaprezentowany w tabeli 5-5 szablon, opracowano trzynaście kart naturalnych wzorców projektowych, które mogą służyć jako inspiracja w *fazie III*: Tworzeniu. Przygotowany przez autorkę szablon inspirowany był kartami NTS (*ang. nature's technology summary*), które wykorzystywane są do badania organizmów żywych przez Biomimicry 3.8 (32). Każdy przykład zawiera tło przyrodnicze, opis zasady działania biologicznego mechanizmu i jej ilustrację, a także odkrytą zasadę projektową wraz z jej ilustracją – pozbawione biologicznych sformułowań i zaprezentowane tak, aby mogły stanowić inspirację dla badaczy, rozwiązujących problemy cywilizacyjne. Szablon karty przedstawiono poniżej (patrz: Tab. 5-5).

Nr karty		(nazwa zwyczajowa organizmu żywego) (nazwa naukowa organizmu żywego)
<b>Funkcja:</b> Określenie <i>co</i> robi natura (1-5 słów).		<b>Strategia:</b> Zwięzłe podsumowanie (10-12 słów) <i>w jaki sposób i dlaczego</i> osiągnana jest funkcja.
<b>Tło przyrodnicze</b>		
Krótki opis kontekstu – siedliska i panujących w nim uwarunkowań – które pozwolą zrozumieć dlaczego badana adaptacja została wykształcona i zasługuje na uwagę. Podstawowe informacje o badanym organizmie lub mechanizmie, które są relewantne do prowadzonych badań.		
<b>Mechanizm</b>		
Krótki opis (100-200 słów), wyjaśniający w prostych słowach zasadę – „naturalną technologię” – <b>jak</b> działa badana strategia. Mechanizm określa co jest potrzebne aby strategia działała właściwie. W opisie warto rozważyć m.in. skalę, kształt, strukturę, formę lub sposób przebiegu procesu.		
<b>Abstrakcyjna zasada projektowa</b>		
Zwięzły opis (1-3 zdania), który w przystępny, pozbawiony biologicznych terminów sposób wyjaśnia zasadę (wzór) działania badanych strategii i mechanizmu. Opis ten powinien być syntezą <b>funkcji, strategii i mechanizmu</b> , które odpowiadają na następujące pytania: (i) <b>po co</b> rozwiązanie jest projektowane, (ii) <b>w jaki sposób i dlaczego</b> ma pełnić ono zdefiniowaną funkcję, (iii) <b>jak</b> powinno ono działać.		
<b>Ilustracja zasady działania mechanizmu</b>	<b>Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej</b>	
Ilustracja ta jest własnoręcznie sporządzonym przedstawieniem tego, w jaki sposób osiągnana jest funkcja i jak działa badana biologiczna strategia.	Ilustracja ta, całkowicie pozbawiona biologii, jest własnoręcznie przygotowanym przedstawieniem zasady działania mechanizmu, która ma służyć projektantom jako źródło inspiracji.	
Podpis ilustracji wraz z ewentualnymi odniesieniami do wykorzystywanych źródeł bibliograficznych.		

**Tab. 5-5** Szablon karty „naturalnych wzorców projektowych”, służącej do opisu badanych strategii i mechanizmów oraz transferu wiedzy biologicznej na informacje przystępne dla wybranej grupy odbiorców. Opracowanie własne.

**Funkcja:** Regulacja temperatury

**Strategia:** Schłodzone powietrze zatrzymane pomiędzy włosiem tworzy warstwę izolacyjną, zapobiegając przegrzaniu ciała.

### Tło przyrodnicze

Liczne adaptacje wielbłądów jednogarbnych, zamieszkujących północną Afrykę i Półwysep Arabski, umożliwiają im przetrwanie długich okresów suszy i wysokich temperatur. Ich garb nawet w 80% może składać się z tłuszczu, który stopniowo ulega procesowi metabolizmu. W wyniku przemian wytwarzane są woda, pożywienie i energia, dzięki którym zwierzęta przez długi okres nie muszą pobierać wody pitnej (201). Dromadery choć mają gruczoły potowe rzadko się pocą. Tolerują one natomiast znaczne wahania temperatury ciała (6-7°C), które nagrzewa się za dnia, a oddaje ciepło nocą (259). W ten sposób ograniczają one straty wody. Ich gruczoły potowe są aktywowane dopiero wtedy, gdy temperatura ciała zwierzęcia osiąga 40°C. Podstawową ochronę przed nadmiernym nagrzewaniem się ciała stanowi zaś warstwa futra, osiągająca grubość nawet 10 cm. Jasna sierść odbija promieniowanie słoneczne oraz tworzy doskonałą izolację termiczną (201).

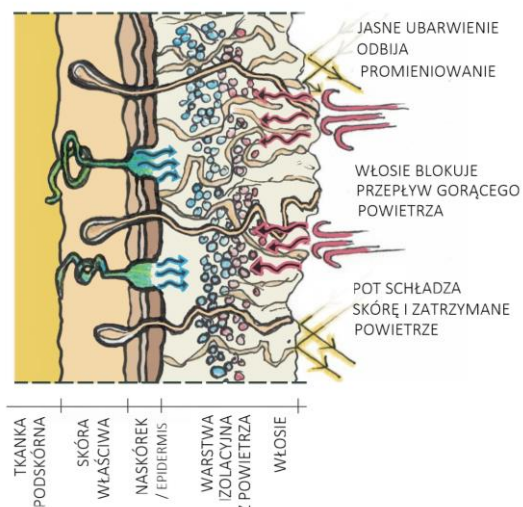
### Mechanizm

Jasna sierść wielbłąda odbija promienie słoneczne, zmniejszając przepływ ciepła do skóry poprzez promieniowanie (201). Ponadto gęste, wełniste futro, osiągające na grzbiecie długość nawet do 10 cm, zapewnia skórze cień i wspomaga tworzenie warstwy izolacyjnej. W przestrzeniach pomiędzy cienkim włosiem zatrzymywane jest powietrze. Gdy ciepota ciała przekracza 40°C aktywowane są znajdujące się pod skórą gruczoły potowe. Wydzielany przez nie pot odparowuje bezpośrednio z powierzchni skóry, chłodząc tym samym ją, jak też część powietrza zatrzymanego pomiędzy włosiem (201). W ten sposób ewaporacja ogranicza przewodzenie ciepła. Włosie utrudnia także ruch powietrza, zmniejszając przepływ ciepła do skóry w wyniku konwekcji. W efekcie wszystkich procesów amplituda temperatur pomiędzy skórą a zewnętrzną powierzchnią włosów może wynieść nawet ponad 30°C (260).

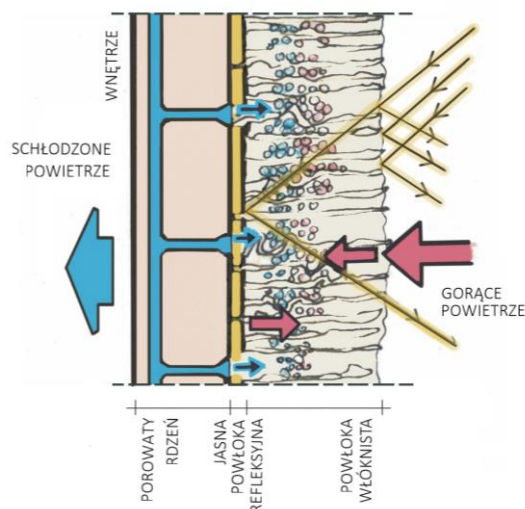
### Abstrakcyjna zasada projektowa

Dwuwarstwowa przegroda, składająca się z włóknistej powłoki o jasnej barwie i porowatego rdzenia, utrzymuje optymalną temperaturę wnętrza. Powłoka odbija promieniowanie słoneczne oraz hamuje przepływ gorącego powietrza, zatrzymując jego cząsteczki pomiędzy włóknami i ograniczając wymianę ciepła. Rdzeń akumuluje ciepło, które uwalnia poprzez odparowanie cieczy. Ciecz ta schładza uwięzione cząsteczki powietrza, zmniejszając przepływ ciepła poprzez przewodzenie.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu



### Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej



Rys. 5-2 Po lewej: a) Ilustracja zasady działania mechanizmu termoregulacyjnego wielbłąda. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie: asknature.org.

**Funkcja:** Ochrona przed promieniowaniem

**Strategia:** Włoski o trójkątnym przekroju rozpraszają i odbijają promieniowania, wpływając na obniżanie temperatury ciała.

### Tło przyrodnicze

By uniknąć drapieżników, występujące na Saharze, Synaju oraz pustyniach Półwyspu Arabskiego srebrne mrówki opuszczają gniazdo w południe, gdy temperatura często przekracza 50°C (204). W tym momencie temperatura gruntu może wynosić nawet 70°C a temperatura ciała insektów wahać się od 48°C do 51°C (261). W takich warunkach owady mogą funkcjonować poza swoim schronieniem przez około 10 minut dziennie. By utrzymać ciepłotę ciała poniżej ich maksymalnej temperatury krytycznej (53,6°C) (262) mrówki w trakcie żerowania zatrzymują się na kamieniach lub suchej roślinności. Gwałtowna różnica temperatur, jaka jest obecna przy powierzchni ziemi sprawia, że w ten sposób owady są w stanie rozładować nadmiar ciepła. Ponadto stosunkowo długie odnóża umożliwiają im szybkie bieganie przy zachowaniu sporego dystansu od podłoża (204). Owady posiadają też włosy, których rolą jest odbijanie promieniowania słonecznego, a poprzez to obniżanie temperatury ciała.

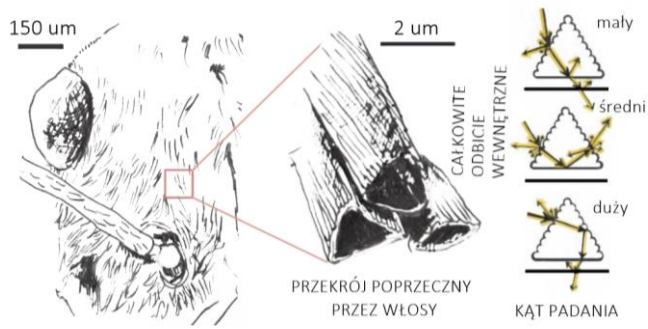
### Mechanizm

Grzbiet i boki ciała mrówki pokrywają liczne chitynowe włoski o trójkątnym przekroju, których srebrna barwa jest efektem ich budowy mikroskopowej (262). Każdy pozbawiony wypełnienia włos o długości ok. 200-300  $\mu\text{m}$ , szerokości 3,5  $\mu\text{m}$  i wysokości 2,4  $\mu\text{m}$  ma trzy ściany. Gładką ułożoną na płasko wzdłuż ciała mrówki oraz dwie zewnętrzne pokryte fałdami. Poszczególne rowki, biegnące skośnie do osi podłużnej włosów, mają głębokość 66 nm i są od siebie oddalone o 204 nm (204). Budowa ta sprawia, że promieniowanie słoneczne w zakresie światła widzialnego (0,4-0,75  $\mu\text{m}$ ) i bliskiej podczerwieni (0,75-1,5  $\mu\text{m}$ ), uderzając w górne ściany włosów, ulega procesowi rozpraszania typu Mie (261). Proces ten zachodzi, gdy długość fali jest mniejsza, bądź zbliżona do rozmiarów cząstek, na których jest rozpraszana. Efektywność odbicia staje się szczególnie wysoka przy pośrednich kątach padania światła (od 30° do 60°) (204). Promienie, którym uda przedostać się do wnętrza włosa uderzają w płaską powierzchnię i ulegają całkowitemu odbiciu wewnętrznemu (261). Z uwagi na to, że włoski są uniesione, pomiędzy nimi a ciałem owada tworzy się szczelina powietrzna (od kilku do 50  $\mu\text{m}$ ), która dodatkowo wzmacnia odbijanie promieniowania krótkofalowego. Jednocześnie pokrywa z włosów nie zatrzymuje, a wręcz przeciwnie, wpływa na zwiększenie odprowadzania nadmiaru ciepła w postaci promieniowania długofalowego emitowanego przez ciało czarne powierzchni owada (204). Z kolei nieowłosiony spód ciała mrówki sprzyja odbijaniu promieniowania długofalowego emitowanego przez podłoże. Dzięki tym mechanizmom temperatura ciała owadów może być niższa nawet o 5-10°C (204).

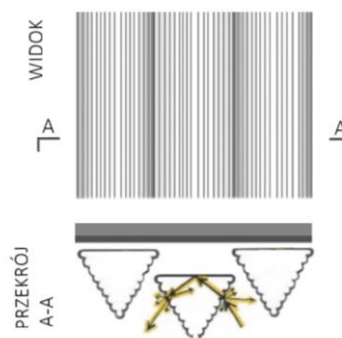
### Abstrakcyjna zasada projektowa

Powłoka z pustych, mikroskopijnych rurek o trójkątnym przekroju chroni przegrodę przed działaniem promieniowania w zakresie światła widzialnego (0,4-0,75  $\mu\text{m}$ ) oraz bliskiej podczerwieni (0,75-1,5  $\mu\text{m}$ ). Promienie słoneczne w trakcie uderzania w zewnętrzne ściany rurek, które pokryte są fałdami o głębokości 66 nm rozstawionymi co 204 nm, ulegają rozproszeniu. Pojedyncze promienie, które przedostaną się do wnętrza rurki są natomiast odbijane przez gładką ścianę ułożoną wzdłuż przegrody.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu



### Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej



**Rys. 5-3** Po lewej: a) Zasada odbijania promieniowania przez włosy saharyjskiej srebrnej mrówki. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie Shi i in. 2015 (261).

**Funkcja:** Ochrona przed promieniowaniem

**Strategia:** Pióra o ciemnej barwie i luźnej strukturze zatrzymują ciepło, które jest uwalniane do otoczenia poprzez promieniowanie i konwekcję.

### Tło przyrodnicze

Występujący w Australii emu jest trzecim co do rozmiarów ptakiem. Prowadzi dzienny tryb życia, spędzając czas na otwartej przestrzeni, co powoduje, że przez większość czasu jest narażony na działanie intensywnego promieniowania słonecznego. Zarówno zwarta budowa, jak też mocne nogi umożliwiają mu bieganie z prędkością nawet 50 km/h. Z uwagi na to, że ptak ma jedynie szczątkowe skrzydła, jest niezdolny do latania. Skrzydła pełnią jednak ważną rolę, wspomagając termoregulację organizmu. Poza głową i nogami jego ciało pokryte jest podwójnymi piórami o brązowym ubarwieniu i czarnych zakończeniach, które zbudowane są z keratyny. Luźna i miękka struktura upierzenia, która jest efektem braku haczyków łączących promienie piór w gładką powierzchnię lotną, chroni emu przed promieniowaniem słonecznym (211).

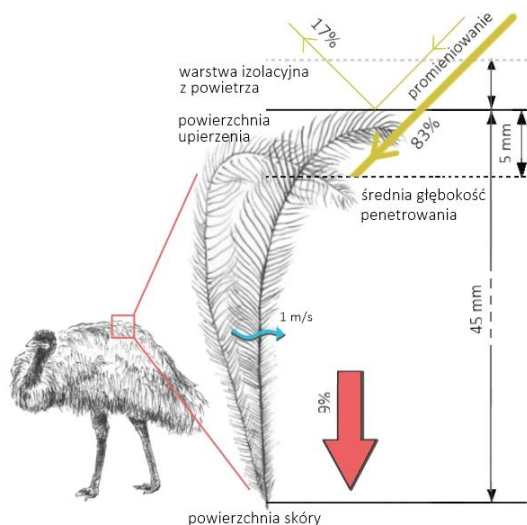
### Mechanizm

Ciemne upierzenie emu odbija promienie słoneczne w niewielkim stopniu, zaledwie w ok. 17%. Barwa i struktura piór wpływa jednak na ograniczenie penetracji promieniowania. Większa jego część (83%) zostaje pochłonięta blisko zewnętrznej powierzchni piór, gdyż promienie słoneczne przenikają jedynie 5 mm w głąb, co stanowi zaledwie 10% grubości okrywy. Tym samym przy niewielkiej prędkości wiatru równej 1 m/s ledwie 9% padającego promieniowania dociera do ciała, powodując jego nagrzewanie. Pochłonięte promieniowanie jest przekształcane w ciepło emitowane do otoczenia. Częściowo poprzez promieniowanie. Przy większych prędkościach wiatru powietrze wdziera się w szczeliny między piórami, które nie posiadają haczyków i nie szpeciają się ze sobą. W ten sposób większość zakumulowanego ciepła zostaje uwolniona do środowiska poprzez konwekcję. Dzięki przepływowi wiatru zmniejszona zostaje także przewodność cieplna piór (211).

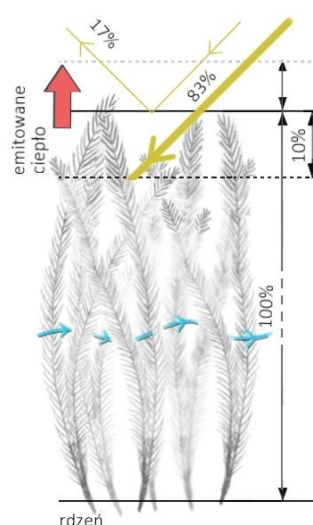
### Abstrakcyjna zasada projektowa

Gęsta powłoka o ciemnej barwie, która składa się z pojedynczych, niespolonych ze sobą elementów, przypominających podwójne pióra emu, pochłania większość promieniowania blisko powierzchni zewnętrznej. Zgromadzone w ten sposób ciepło emitowane jest do otoczenia przez promieniowanie. Ponadto swobodny przepływ wiatru w szczelinach między luźnymi elementami wzmacnia uwalnianie ciepła i zmniejsza przewodność cieplną powłoki.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu



### Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej



**Rys. 5-4** Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu termoregulacyjnego emu. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie Dawson i Maloney, 2004 (211)..

**Funkcja:** Regulacja temperatury

**Strategia:** Kontrolowany przepływ krwi odpowiada za regulowanie temperatury ciała.

### Tło przyrodnicze

Te obecnie największe zwierzęta lądowe zamieszkują afrykańskie stepy, lasy i sawannę. Żerują rano i wieczorem, a najgorętszy okres dnia spędzają w pobliżu wody, schowane w cieniu drzew. Dziennie spożywają nawet ponad 200 l płynów. W związku z tak dużym zapotrzebowaniem w przypadku braku dostępu do zbiorników wodnych słonie rozgrzebują głęboko grunt. Nie mają one gruczołów potowych (219), dzięki czemu nie tracą wody z organizmu w wyniku parowania. Z tego względu musiały wykształcić inne metody regulowania temperatury ciała. Jednym ze sposobów jest codzienne zażywanie kąpeli lub polewanie się, które natychmiastowo schładza ciało słoni. W trakcie tej czynności część wody zostaje zatrzymana pomiędzy zmarszczkami, a następnie odparowuje, uwalniając ciepło do otoczenia.

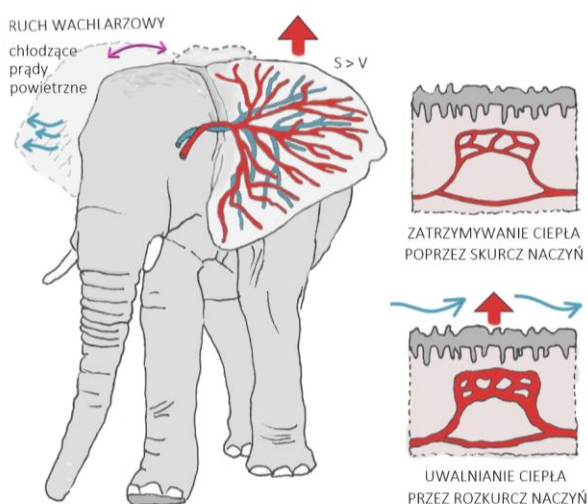
### Mechanizm

Uszy słoni afrykańskich (o długości do 1,5 m) charakteryzuje duży stosunek powierzchni do objętości oraz silne ukrwienie, co sprzyja utrzymaniu optymalnej temperatury ciała. Podobnie ukrwione obszary znajdują się również w innych rejonach ciała zwierzęcia (219). Wymiana ciepła polega na regulowanym przepływie krwi. W trakcie krążenia dochodzi do zwężania i rozszerzania naczyń krwionośnych, co odpowiednio zapobiega i sprzyja utracie ciepła do otoczenia w wyniku promieniowania i przewodzenia (263). Gdy temperatura otoczenia przekracza 21°C (219), słonie spryskują uszy wodą a następnie wykonują nimi ruchy wachlarzowe, wymuszając w ten sposób powstawanie chłodzących prądów powietrznych. Działanie to wspomaga proces uwalniania ciepła, w wyniku którego zwierzęta mogą obniżyć temperaturę krwi nawet o 9°C (131).

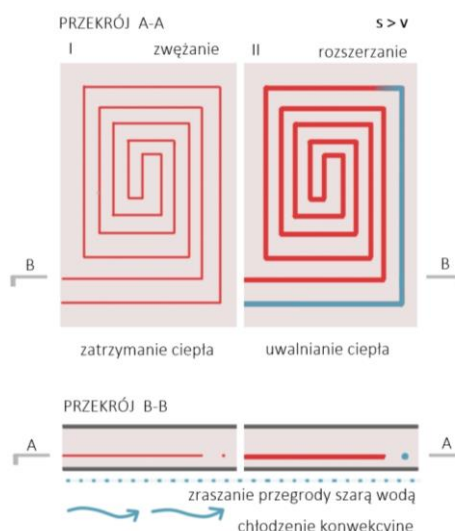
### Abstrakcyjna zasada projektowa

Cienka powłoka o dużym stosunku powierzchni do objętości, wyposażona w system powierzchniowych rurek wypełnionych cieczą umożliwia regulowanie temperatury przegrody. Kontrola cyrkulacji cieczy zachodzi poprzez zwężanie lub rozszerzanie przekroju rurek, wpływając odpowiednio na zmniejszoną, bądź zwiększoną wymianę ciepła, która może być dodatkowo wzmocniona przez zraszanie przegrody i wzmocniony ruch powietrza przy jej powierzchni.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu



### Ilustracja abstrakcyjnej zasady proj.



**Rys. 5-5** Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu termoregulacyjnego słonia. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie Domínguez-Oliva i in. 2022 (263).

**Funkcja:** Regulacja temperatury

**Strategia:** Przeciwprądowa wymiana ciepła odpowiada za regulowanie temperatury mózgu.

### Tło przyrodnicze

Oryksy wstępują na pustynnych oraz trawiastych terenach południowo-zachodniej Afryki. Zwierzęta te żerują głównie rano, wieczorem, bądź nocą, ograniczając ekspozycję na promieniowanie słoneczne. W okresie najwyższych temperatur gromadzą się w cieniu (264). Tam odstaniają kopytami chłodny piasek znajdujący się pod powierzchnią i siadają w przygotowanych przez siebie zagłębieniach. W ten sposób chłodzą ciało. Oryksy tolerują duże wahania temperatury ciała, dzięki czemu ograniczają utratę wody poprzez parowanie. Za dnia akumulują ciepło, a następnie pasywnie obniżają temperaturę ciała w nocy (heterotermia) (198). Jednak by przetrwać zwierzęta te musiały wykształcić mechanizm umożliwiający chłodzenie mózgu (221).

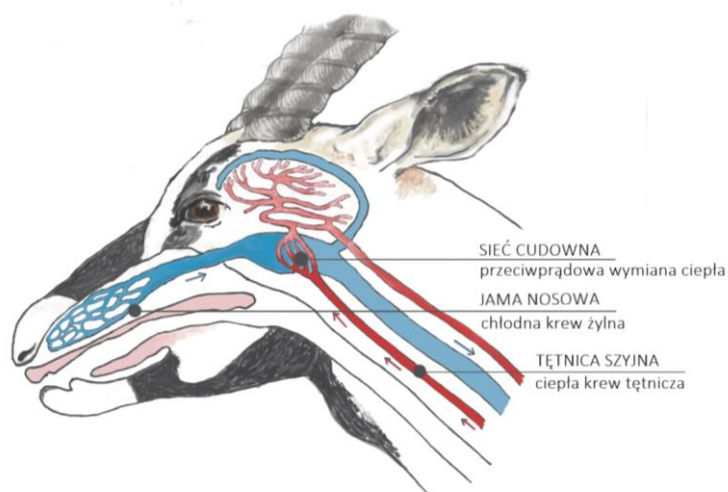
### Mechanizm

Oryksy wykorzystują mechanizm wybiórczego chłodzenia mózgu, polegający na kontrolowanym przepływie krwi. Mechanizm ten uruchamiany jest w momencie, gdy organizm zwierzęcia zagrożony jest przegrzaniem. Wtedy w celu ograniczenia strat wody w podwzgórze dochodzi do zmniejszenia aktywności wrażliwych na temperaturę neuronów, które sterują utratą ciepła poprzez odparowanie (221). Tym samym aktywowana jest inna droga oddawania ciepła, polegająca na przeciwprądowej wymianie ciepła. Tętnica szyjna, którą ciepła krew kierowana jest z serca do mózgu, rozgałęzia się u jego podstawy na liczne drobne naczynia tętnicze, tworząc tak zwaną sieć dziwną (*łac. rete mirabile*). Sieć ta zanurzona jest w rozlewisku żylnym, do którego dociera schłodzona przez błony śluzowe nosa krew żylna. Następujący w tym miejscu przeciwprądowy przepływ ciepłej krwi tętniczej oraz chłodnej krwi żylniej powoduje obniżenie temperatury krwi tętniczej płynącej do mózgu (265).

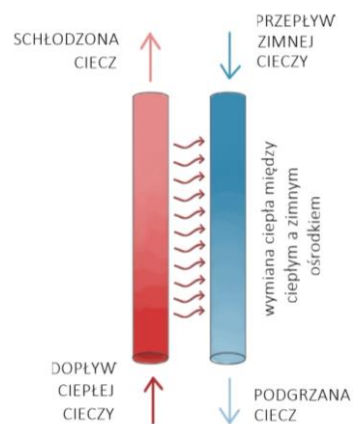
### Abstrakcyjna zasada projektowa

System składający się z przeciwnie biegnących rur wypełnionych płynem o różnych temperaturach umożliwia regulowanie temperatury dzięki ich wzajemnemu oddziaływaniu. Przeciwprądowy przepływ płynów przyczynia się do wymiany ciepła pomiędzy cieplejszym a chłodniejszym ośrodkiem. W efekcie temperatura cieplejszego płynu zostaje obniżona a chłodniejszego podwyższona.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu



### Ilustracja abstrakcyjnej zasady proj.



Rys. 5-6 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu wybiórczego chłodzenia mózgu. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie OpenLearn..

**Funkcja:** Regulacja temperatury

**Strategia:** Długie, luźno runo o zróżnicowanej strukturze i długości włosa wspomaga regulację temperatury ciała.

### Tło przyrodnicze

Awassi należy do ras owiec pochodzących z Bliskiego Wschodu, gdzie występuje pora zimna i ciepła. W naturalnym środowisku zwierzęta te poddawane są odpowiednio działaniu ulewnych deszczy, następnie zaś wysokich temperatur i suszy. Aby chronić się przed promieniowaniem słonecznym, owce mają zwyczaj chowania głów pod brzuchami innych członków stada, dzięki czemu zapewniają sobie cień. Ich naturalną ochronę stanowi również runo (223).

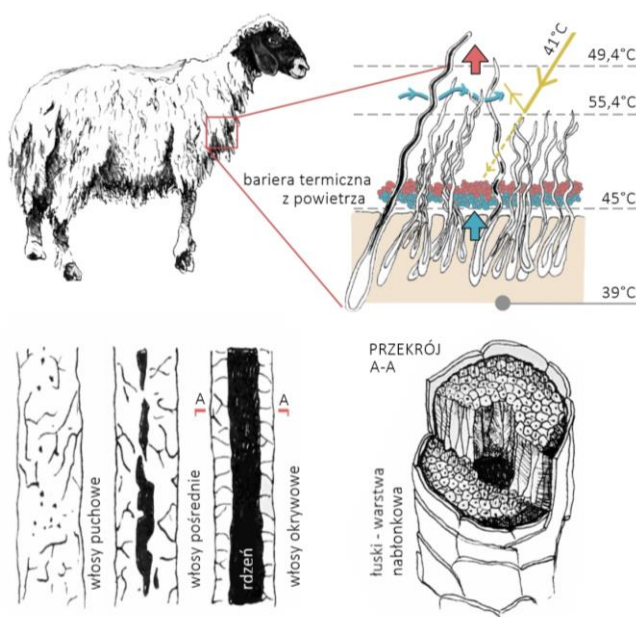
### Mechanizm

Długa, luźna okrywa włosowa Awassi złożona jest z trzech frakcji anatomicznych: (i) pozbawionych rdzenia, krótkich, cienkich włosów puchowych, (ii) nieco dłuższych i grubszych włosów przejściowych ze śladowymi ilościami rdzenia, (iii) posiadających rdzeń, długich, sztywnych włosów okrywowych, które zaciniają wrażliwą, pozbawioną pigmentów skórę. Każdy włos pokryty jest z wierzchu warstwą nabłonkową, składającą się z płaskich, nachodzących na siebie łusek, które odbijają promienie słoneczne, nadając włosom białą barwę i efekt połysku (223). W wolnych przestrzeniach między włosiem zatrzymywane są cząsteczki powietrza. W ten sposób pomiędzy naskórkiem a otoczeniem powstaje bariera termiczna, której temperatura oraz wilgotność regulowane są przez aktywność fizjologiczną skóry (wydzielanie potu z jej powierzchni) oraz warunki zewnętrzne. W środku dnia przy temperaturze otoczenia 41°C, promieniowanie nagrzewa środkową warstwę runa do 55,4°C. Chłodzenie konwekcyjne sprawia, że temperatura na powierzchni wełny jest niższa i wynosi 49,4°C. Jednocześnie temperatura powierzchni skóry osiąga 45°C przy zachowanej ciepłocie ciała równej 39°C (266).

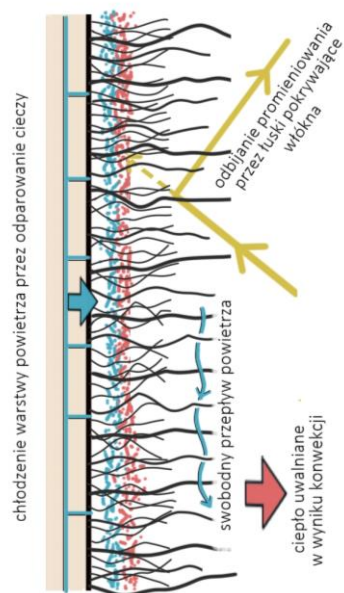
### Abstrakcyjna zasada projektowa

Izolacja składająca się z trzech rodzajów włókien, krótkich bez rdzenia oraz średnich i długich, posiadających rdzeń, pokrytych refleksyjnymi płytkami pozwala utrzymać optymalną temperaturę przegrody. Włókna, zatrzymując cząsteczki powietrza, tworzą barierę termiczną, której temperatura regulowana jest przez odparowującą cieć.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu



### Ilustracja abstrakcyjnej zasady proj.



**Rys. 5-7** Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu termoregulacyjnego furta owcy Awassi. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie Epstein, 1985 (223).



**Funkcja:** Regulacja temperatury

**Strategia:** Manipulacja położeniem skrzydeł i piór odpowiada za regulację temperatury ciała.

### Tło przyrodnicze

Struś czerwonoskóry, należący do nietotów, jest obecnie największym żyjącym ptakiem. Występuje na pustynnych i półpustynnych obszarach Afryki północnej, gdzie większość dnia spędza w pozycji stojącej wyeksponowany na działanie promieni słonecznych (227). Podczas biegu struś jest w stanie osiągnąć prędkość nawet 70 km/h. Podobnie jak inne ptaki nie posiada gruczołów potowych. W razie potrzeby temperaturę ciała obniża natomiast w wyniku parowania w trakcie ziajania (267). Ponadto jego długie, mocno unaczynione, nagie kończyny i szyja zapewniają mu dużą powierzchnię odprowadzania ciepła przez konwekcję i promieniowanie. Poza głową i brzuchem reszta ciała strusia pokryta jest piórami zbudowanymi z keratyny w większości posiadającymi ciemną barwę (czarne u samców, u samic brązowe z jasnymi zakończeniami). Pióra strusi nie szepią się ze sobą z uwagi na to, że nie posiadają haczyków, które łączą promienie w gładką powierzchnię lotną. Są za to miękkie i puchate, pełniąc ważną rolę w regulacji temperatury organizmu zwierzęcia (227).

### Mechanizm

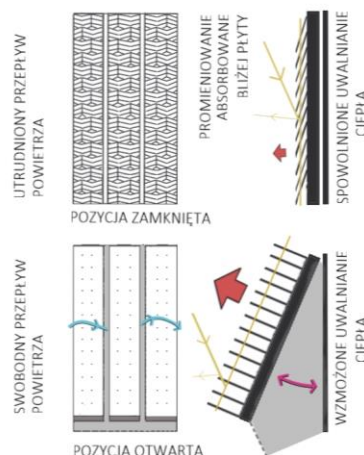
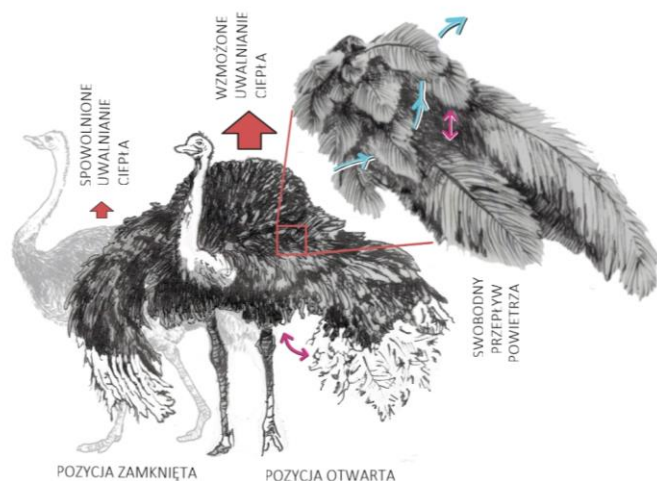
W czasie wysokich temperatur struś wznosi swoje skrzydła, zwiększając przestrzeń powietrzną przy skórze oraz zacieniając tułów. W tym czasie między szczelinami postrzępionych piór dochodzi do przepływu powietrza, co wzmacnia efekt chłodzenia w wyniku konwekcyjnej wymiany ciepła. Podczas wzrostu temperatury ciała ptak unosi długie, rzadko rozmieszczone pióra grzbietowe, zwiększając warstwę izolacyjną. Ciemna barwa piór i ich struktura powodują, że promieniowanie zatrzymywane jest blisko powierzchni zewnętrznej, co ogranicza nagrzewanie ciała. W nocy, gdy temperatura gwałtownie się obniża, strusie składają skrzydła blisko tułowia, chowają nogi pod ciało oraz spłaszczają i zazębiają pióra grzbietowe. W ten sposób tworzą izolację, dzięki której utrzymują optymalną temperaturę ciała w zakresie 38-39°C (227).

### Abstrakcyjna zasada projektowa

Powłoka izolacyjna zbudowana z ruchomych płyt pokrytych luźnymi włóknami pozwala utrzymać optymalną temperaturę przegrody. Ruch płyt oraz zmiana ułożenia włókien, ich składanie i rozkładanie, powodują zmianę grubości izolacji, co wpływa na ilość uwalnianego do otoczenia ciepła. Ruchome płyty, składające się z pojedynczych elementów, między którymi dochodzi do swobodnego przepływu powietrza, otwierając się zwiększają przestrzeń powietrzną przy przegrodzie oraz zapewniają cień, a tym samym wzmagają efekt konwekcyjnej wymiany ciepła.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu

### Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej



Rys. 5-8 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu termoregulacyjnego strusia. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Opracowanie własne.

**Funkcja:** Regulacja temperatury

**Strategia:** Bezwładność termiczna gromadzonej w łodydze wody oraz zmiana grubości żeber zapewniają ochronę przed dużymi wahaniami temperatur.

### Tło przyrodnicze

Występująca na pustyni Sonora karnegia olbrzymia to największy gatunek kaktusa kolumnowego, którego łodyga przeciętnie osiąga wysokość 10 m i średnicę 65 cm. W zależności od uwarunkowań klimatycznych, głównie dostępności wody, karnegia olbrzymia zwana też saguaro wypuszcza rozgałęzienia lub nie (268). Jego łodygę tworzy od 12 do 24 żeber, które co 1,2-3 cm pokrywają areole. Areole te wypuszczają od 15 do 30 spłaszczonych lub okrągłych kolców, osiągających długość od 2,5 do 5 cm (269). Kolce, które rosną od strony południowej są statystycznie dłuższe, zapewniając w ten sposób więcej cienia (270). Ich obecność spowalnia przepływ powietrza, co wspomaga tworzenie warstwy izolacyjnej przy powierzchni rośliny. Efektywność izolacji jest większa od strony południowej, czyli tam gdzie przestrzeń między żebrami znajdują się bliżej siebie i są głębsze (268). Ponadto cylindryczny kształt kaktusa zapewnia mu minimalną powierzchnię eksponowaną na promieniowanie przy zachowaniu dużej objętości do magazynowania płynów (271). Dojrzałe okazy ważą średnio od 3 do 4 t, z czego nawet 85-90% tej wagi może stanowić woda. Większość cieczy (95-97%), która między innymi wykorzystywana jest do regulacji temperatury, przechowywana jest w tkankach łodygi. Choć łodygę pokrywa warstwa wosku (kutykula), która ogranicza transpirację, podczas okresów suchych kaktus może stracić nawet od 23 do 54% zgromadzonego płynu (269).

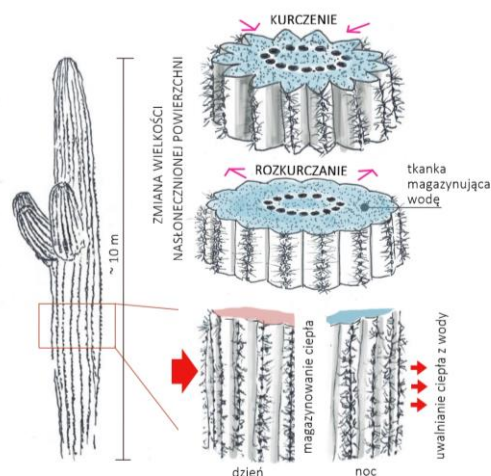
### Mechanizm

W ciągu dnia duża zdolność do magazynowania ciepła (bezwładność cieplna), gromadzonej w łodydze kaktusa wody zapobiega nagrzewaniu jego tkanek do wysokości temperatur zewnętrznych. Nocą natomiast ciepło cieczy jest powoli uwalniane, chroniąc te tkanki przed przemrożeniem (241). Regulację temperatury wspomaga kurczenie i rozszerzanie pionowych żeber kaktusa, będące reakcją odpowiednio na brak i dostatek wody w środowisku. Zachowanie to prowadzi do zwiększania lub zmniejszania głębokości pomiędzy żebrami a tym samym dostosowywania wielkości powierzchni eksponowanej na bezpośrednie działanie promieni słonecznych (270).

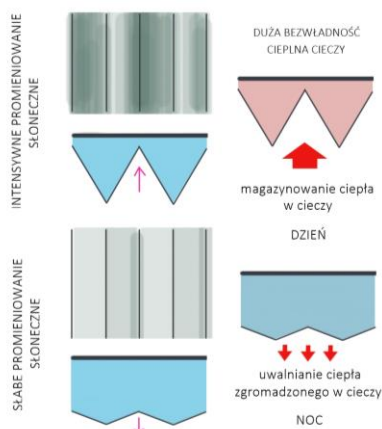
### Abstrakcyjna zasada projektowa

Duża zdolność do magazynowania ciepła (bezwładność termiczna), gromadzonej w przegrodzie cieczy pozwala utrzymać optymalną temperaturę tej przegrody. W ciągu dnia ciecz pochłania ciepło, które jest stopniowo gromadzone i rozpraszane nocą. Regulację temperatury wspomaga pofalowana powierzchnia przegrody, której fałdy kurczą się i rozszerzają, odpowiednio zmniejszając i zwiększając powierzchnię eksponowaną na działanie promieni słonecznych.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu



### Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej



Rys. 5-9 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu termoregulacyjnego saguaro. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Opracowanie własne.

**Funkcja:** Ochrona przed promieniowaniem

**Strategia:** Orientowanie liści względem pozycji słońca reguluje ilość pochłanianego promieniowania.

### Tło przyrodnicze

*Ceanothus crassifolius* to wiecznie zielony, rozłożysty krzew o wzniesionym pokroju, osiągający wysokość do 4 m. Jest dominującym gatunkiem chaparralu (zimozielonej zaroślowej formacji roślinnej), który preferuje stanowiska suche i nasłonecznione. Powszechnie występuje na terenach południowej Kalifornii (stanu USA) oraz północnej Baji Kalifornii (stanu Meksyku). Pomimo tego, że krzew ma płytki system korzeniowy, toleruje on niewielkie ilości opadów (250 mm rocznie) i duże wahania temperatury ze spadkami do - 11°C. Eliptyczne liście prusznika są ułożone naprzeciwległe i osiągają długość 1-3,5 cm. Ich krawędzie posiadają szeroko rozstawione ząbki. Z wierzchu blaszka liści ma barwę oliwkowozieloną. Spód jest natomiast jaśniejszy, pokryty białymi włoskami. Białe, bądź jasnobrązowe włoski są obecne również na młodych gałązkach krzewu. Ich rolą jest odbijanie promieniowania słonecznego (272).

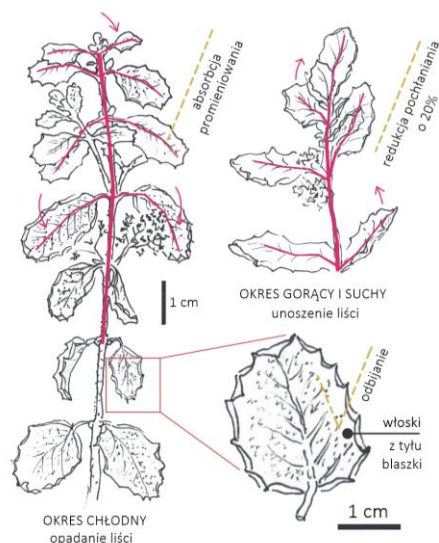
### Mechanizm

Liście znajdujące się na szczycie prusznika układają się bardziej pionowo w stosunku do tych znajdujących się poniżej, co zapobiega ich wzajemnemu zacienianiu. Aby chronić się przed nadmiernym promieniowaniem liście zmieniają swoją orientację. Zmiana ta zachodzi adekwatnie do kąta padania promieni słonecznych. Ich ruch regulowany jest dostępnością wody, która zależy od pory roku. W okresie suchym liście są ustawione niemal pionowo. Pozycja ta pozwala na zmniejszenie ilości pochłanianego promieniowania słonecznego o 20% a tym samym obniżenie temperatury powierzchni liści oraz redukcję transpiracji. Zimą i wczesną wiosną, gdy panują niższe temperatury a dostępność wody jest większa, ułożenie liści zmienia się na bardziej poziome, co pozwala zwiększyć absorpcję energii słonecznej (242).

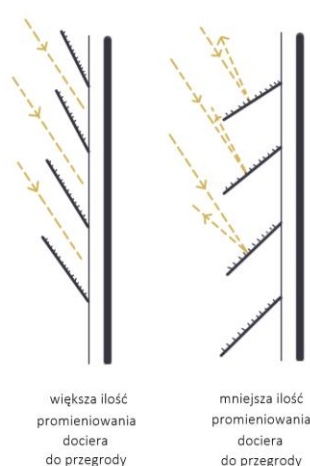
### Abstrakcyjna zasada projektowa

Powłoka składająca się z jasnych płytek pokrytych z wierzchu krótkim włosiem chroni przegrodę przed promieniowaniem. Nieco inny kąt nachylenia poszczególnych płytek zapobiega ich wzajemnemu zacienianiu, podczas gdy pokrywające je wypustki odbijają promienie słoneczne. Płytki zmieniają ułożenie w zależności od kąta padania promieni słonecznych. Pozycja pozioma zwiększa ilość pochłanianego przez płytki promieniowania a pozycja pionowa zmniejsza. W ten sposób regulowana jest ilość energii cieplnej, która dociera do przegrody.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu



### Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej



Rys. 5-10 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu regulującego ilość pochłanianego przez liście promieniowania słonecznego. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Opracowanie własne.

**Funkcja:** Ochrona przed promieniowaniem

**Strategia:** Orientowanie ramion pokrytych kolcami w stosunku do promieni słonecznych chroni roślinę przed promieniowaniem.

### Tło przyrodnicze

Ze względu na brak zachmurzenia, występująca na pustyniach Sonora i Kolorado (273), opuncja przez większość roku poddana jest działaniu intensywnego promieniowania słonecznego. Roślina ta znosi znaczne wahania temperatur ze spadkami do  $-15^{\circ}\text{C}$ . Jej cylindryczny pień z licznymi bocznymi rozgałęzieniami o średnicy około 3 cm osiąga wysokość około 1,5 m. Starsze, niżej położone gałęzie obumierają i odpadają. Młode zaś niemal całkowicie osłaniają todygę (245). W dodatku powierzchnię todygi gęsto pokrywają równomiernie rozproszone areole, które wypuszczają od 10 do 15 żółtych kolców o długości do 2,5 cm. Kolce sąsiadujących ze sobą areoli zazębiają się ze sobą, niemal całkowicie zacinając todygę, co spowalnia nagrzewanie jej powierzchni. Hamują one także przepływ powietrza [63]. Poprzez to przy powierzchni rośliny powstaje warstwa izolacyjna, która za dnia ogranicza konwekcyjną wymianę ciepła aż o 13% w stosunku do powłoki pozbawionej kolców. Nocą zaś izolacja ta powoduje wolniejsze uwalnianie ciepła, chroniąc roślinę przed przemrożeniem [92].

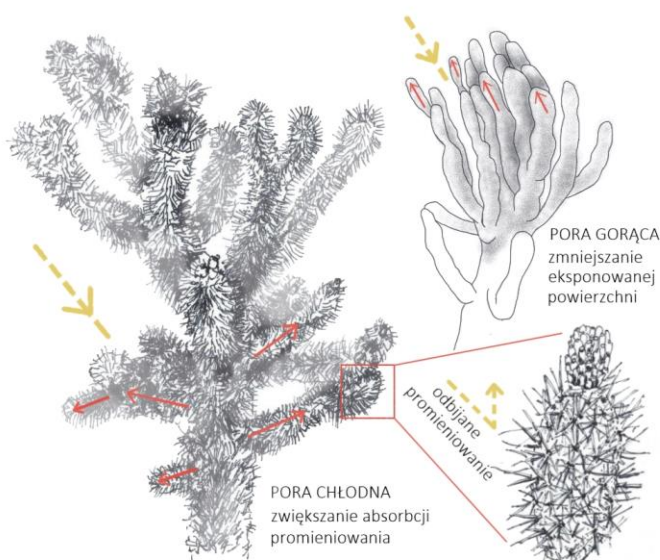
### Mechanizm

W zależności od pory roku opuncja orientuje swoje ramiona adekwatnie do kąta padania promieni słonecznych. Latem kieruje ona czubki gałęzi w stronę słońca, zmniejszając tym samym powierzchnię wystawioną na jego bezpośrednie działanie. Natomiast, gdy temperatury są niższe, roślina układa ramiona bokiem, zwiększając w ten sposób ilość absorbowanej energii (274). Wpływ na ilość pochłanianego promieniowania wywierają również jasne kolce, odbijające promienie słoneczne (246).

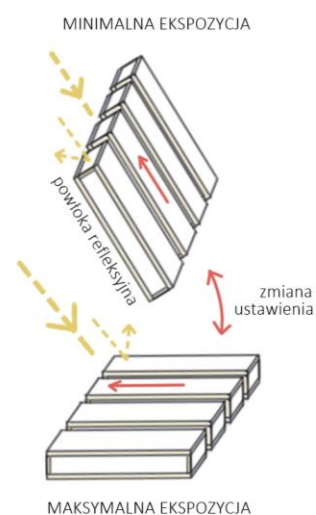
### Abstrakcyjna zasada projektowa

Zmiana ułożenia brył w zależności od kąta padania promieni słonecznych w danej porze roku pozwala zaadaptować je do warunków zewnętrznych. Maksymalna, bądź minimalna ekspozycja ich powierzchni na działanie promieniowania pozwala odpowiednio zwiększać, bądź ograniczać ilość pochłanianej przez nie energii cieplnej. Wpływ na to ma także pokrywająca bryłę warstwa odbijająca światło.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu



### Ilustracja abstrakcyjnej zasady proj.



**Rys. 5-11** Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu regulującego ilość pochłanianego przez opuncję promieniowania słonecznego. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Opracowanie własne.

**Funkcja:** Ochrona przed promieniowaniem

**Strategia:** Zmiana zagęszczenia, grubości i rodzaju pokrywy włosowej pozwala modyfikować ilość pochłanianego promieniowania.

### Tło przyrodnicze

*Encelia farinosa* jest odpornym na suszę krzewem, osiagającym do 1,5 m wysokości. Występuje on na obszarach pustynnych południowo-zachodniej Ameryki Północnej, gdzie poddany jest działaniu intensywnego promieniowania słonecznego, znacznych wahań temperatury oraz niskiej wilgotności. Roślina ma drobne liście o długości 2-5 cm i szerokości 1,5-2,5 cm, które wymienia w zależności od warunków panujących w danej porze roku (275). Głównymi elementami, ulegającymi zmianie są komórki miększu palisadowego, odpowiedzialne za fotosyntezę oraz pokrywa włosowa liści. Dzięki odmiennym strukturom włosów roślina może modyfikować ilość pochłanianego promieniowania (247), co umożliwia utrzymanie temperatury liści znacznie poniżej temperatury otoczenia (276).

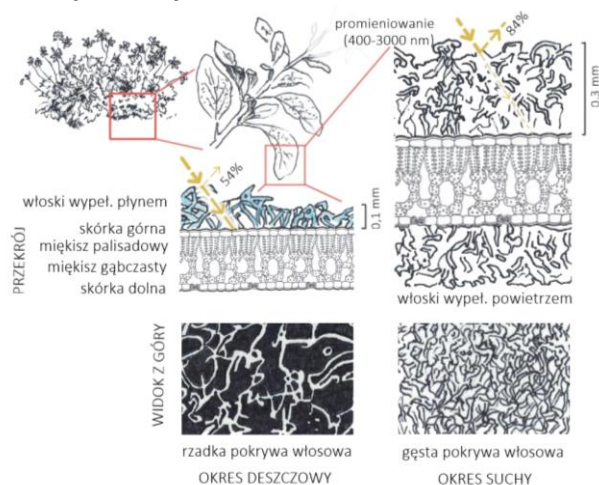
### Mechanizm

Podczas trwającego przez cały rok okresu wegetacyjnego *Encelia* adaptuje się do sezonowych zmian temperatury oraz wilgotności. W czasie wzrostu na początku okresów deszczowych krzew wypuszcza zielone liście o pokrywie o grubości około 0,1 mm, składającej się z rzadko rozmieszczonych srebrnych włosków. Włoski te zbudowane są z 5-6 żywych komórek wypełnionych płynem. Wraz ze wzrostem temperatury i spadkiem wilgotności dochodzi do stopniowej wymiany ulistnienia. Nowe liście mają bardzo długie, poskręcane włoski po obu stronach blaszki. Gęsta i gruba (średnio 0,3 mm) pokrywa włosowa całkowicie przysłania epidermę. W związku z tym promieniowanie widzialne (400-700 nm), biorące udział w fotosyntezie, przenika do skóry w wyniku wielokrotnego odbicia w zaledwie 29%. Pozostałe około 71% promieniowania zostaje odbite do otoczenia. Nowe włoski są martwe i wypełnione powietrzem, co redukuje ilość pochłanianego promieniowania podczerwonego (700-3000 nm), przyczyniającego się do nagrzewania liści. W czasie pojedynczego cyklu absorpcja zmniejsza się z 81% na początku okresu wegetacyjnego do 29% na jego końcu w przypadku promieniowania widzialnego i z 46% do 16% w przypadku całego widma słonecznego (400-3000 nm) (247).

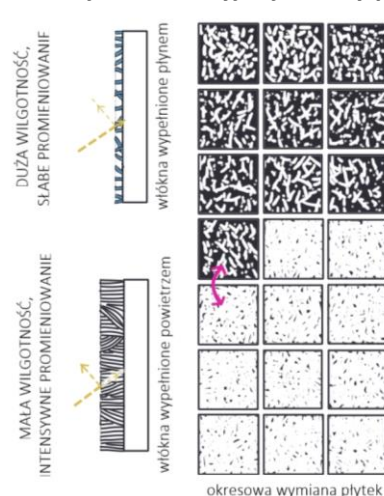
### Abstrakcyjna zasada projektowa

Powłoka z dwóch rodzajów wymiennych płytek umożliwia regulowanie ilości docierającego do przegrody promieniowania. Przy słabym promieniowaniu i dużej wilgotności montowane są płytki o pokrywie, składającej się z rzadkiego, jasnego włosia wypełnionego płynem. Drugi rodzaj płytek, odbijający większą ilość promieniowania słonecznego w całym jego widmie (400-3000 nm), ma trzy razy grubszy rdzeń, całkowicie zakryty tej samej grubości warstwą gęstego, wypełnionego powietrzem włosia. Płytki te są montowane gdy intensywność promieniowania rośnie, a wilgotność spada.

#### Ilustracja zasady działania mechanizmu



#### Ilustracja abstrakcyjnej zasady proj.



**Rys. 5-12** Po lewej: a) Działanie mechanizmu regulującego ilość pochłanianego promieniowania przez liście *Encelii*. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podst. Ehleringer i Björkman, 1978 (247).

**Funkcja:** Ochrona przed promieniowaniem

**Strategia:** Sferyczny kształt oraz wydatne żebra pokryte kolcami zapewniają ochronę przed promieniowaniem.

### Tło przyrodnicze

*Ferocactus wislizeni* to gatunek kaktusa spotykany na pustyniach Sonora i Chihuahua, gdzie zaledwie przez dwa miesiące występują deszcze, a przez pozostałą część roku roślina wystawiona jest na intensywne działanie promieniowania słonecznego. Kaktus znosi duże wahania temperatury ze spadkami nawet do  $-15^{\circ}\text{C}$ . Posiada on łodygę o kulistym, rzadziej cylindrycznym kształcie i średnicy osiągającej od 45 do 83 cm. Roślinę tworzy od 20 do 28 pionowych żeber, których pofałdowane grzbiety są gęsto pokryte areolami. Każda z nich wypuszcza od 16 do 24 haczykowato zagiętych kolców, z których cztery centralne osiągają długość od 3,8 do 5 cm, a pozostałe promieniście ułożone do 4,5 cm (277). Kolce te odbijają promienie słoneczne, zaciniają łodygę oraz zakłócają przepływ powietrza, spowalniając w ten sposób transpirację. Warstwa wosku (kutykula), pokrywająca łodygę kaktusa również chroni go przed utratą wody (249).

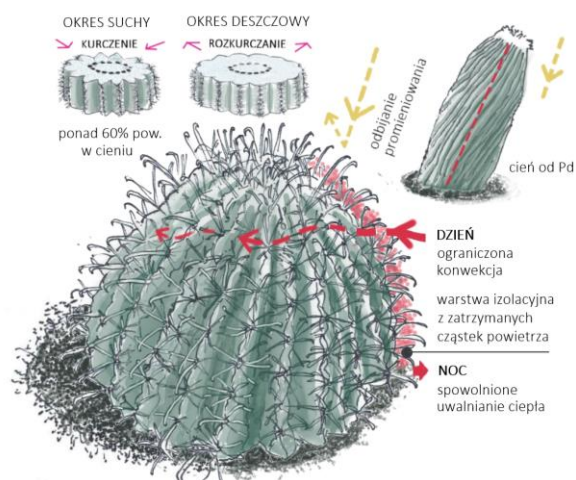
### Mechanizm

W naturalnych warunkach feroakktus rośnie pod kątem, nachylony w stronę południową. Dzięki temu jego łodyga jest częściowo zacieniona. Sferyczny kształt łodygi zapewnia roślinie maksymalną objętość do magazynowania wody przy zachowaniu minimalnej powierzchni eksponowanej na promieniowanie. Ekspozycję dodatkowo zmniejszają reagujące na zachodzące zmiany w gospodarce wodnej wydatne żebra kaktusa. Podczas suszy żebra kurczą się, tworząc głębokie reliefy. W wyniku tego ponad 60% powierzchni łodygi znajduje się w cieniu, co spowalnia proces nagrzewania w ciągu dnia. Wraz z gęsto pokrywającymi je haczykowato zakończonymi kolcami żebra zaburzają przepływ powietrza, tworząc w ten sposób warstwę izolacyjną na całej powierzchni łodygi. Za dnia izolacja ta ogranicza konwekcyjną wymianę ciepła, nocą zaś spowalnia jego utratę (249).

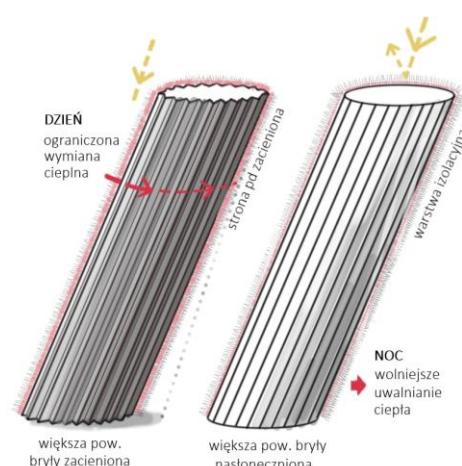
### Abstrakcyjna zasada projektowa

Przechylona w kierunku padania najbardziej intensywnego promieniowania bryła o cylindrycznym kształcie i mocno pofałdowanej powierzchni jest chroniona przed intensywnym promieniowaniem. Fałdy kurczą się i rozszerzają, dostosowując wielkość powierzchni eksponowanej na działanie promieni słonecznych. Ponadto fałdy gęsto pokrywają promieniście rozłożone wypustki, które zatrzymują cząstki powietrza, tworząc w ten sposób warstwę izolacyjną na całej powierzchni bryły. Warstwa ta w ciągu dnia ogranicza konwekcyjną wymianę ciepła, nocą zaś spowalnia jego uwalnianie.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu



### Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej



**Rys. 5-13** Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu regulującego ilość pochłanianego promieniowania słonecznego przez feroakktusa. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne.

**Funkcja:** Ochrona przed promieniowaniem

**Strategia:** Przestrzenna orientacja liści zapewnia ochronę przed intensywnym promieniowaniem słonecznym.

### Tło przyrodnicze

Natywna dla pustyni Sonora Simondsja kalifornijska preferuje otwarte, suche stanowiska, które współdzieli wraz z innymi typowymi gatunkami chaparralu (256). Jest ona przystosowana do dużych wahań temperatury (od 46°C do -9°C) oraz małej ilości opadów, nawet poniżej 100 mm rocznie. Roślina rozwija system korzeniowy, który może sięgać do pokładów wodnych, znajdujących się nawet na głębokości 10 m. Forma tego wiecznie zielonego, silnie rozgałęzionego krzewu zależy od środowiska, w którym występuje. Na glebach pustynnych roślina przyjmuje pokrój półwzniesiony (278). Posiada ona niewielkie, skórzaste liście o sinzielonej barwie, które wymienia co 2-3 sezon. Liście te pokrywają włoski oraz warstwa wosku (kutykula), która ogranicza straty wody w wyniku ewapotranspiracji (256). Jedynie w okresach dotkliwych suszy roślina zrzuca liście, aby dodatkowo ograniczyć czynną powierzchnię parowania (278).

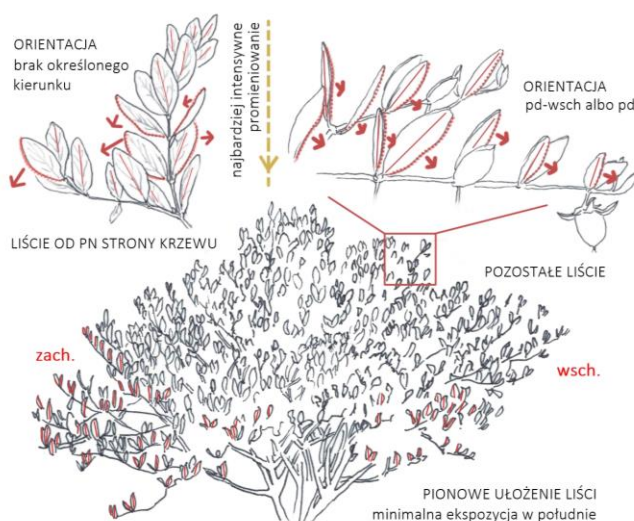
### Mechanizm

Grube, ułożone naprzeciwległe liście simondsji kalifornijskiej o długości od 2 do 4 cm podlegają orientacji przestrzennej (256). Liście jojoby rosną pionowo, czyli równoległe do kąta padania promieni słonecznych w okresie południa, co optymalizuje ilość gromadzonego przez nie w trakcie dnia ciepła. Te, które znajdują się od północy nie są skierowane w żadnym określonym kierunku, gdyż z uwagi na cień rzucany przez krzew nie są narażone na bezpośrednie działanie promieni słonecznych. Pozostałe liście są natomiast zorientowane w kierunku południowym lub południowo-wschodnim. Zachowanie to, w przypadku rośliny występującej na półkuli północnej, pozwala ograniczyć czas wystawy, a tym samym chronić liście przed nadmiernym działaniem intensywnego promieniowania (255).

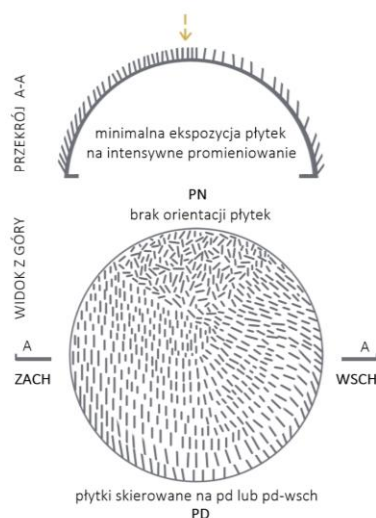
### Abstrakcyjna zasada projektowa

Płytki, które tworzą strukturę, ułożone są równoległe do kąta padania najbardziej intensywnego promieniowania słonecznego w ciągu dnia, chroniąc w ten sposób swoją powierzchnię przed nadmiernym promieniowaniem. Ponadto w przypadku półkuli północnej, płytki, które znajdują się ze stron wyeksponowanych na działanie promieni słonecznych zorientowane są w kierunku południowym lub południowo-wschodnim.

### Ilustracja zasady działania mechanizmu



### Ilustracja abstrakcyjnej zasady proj.



**Rys. 5-14** Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu regulującego ilość pochłanianego promieniowania przez liście jojoby. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Opracowanie własne.

W oparciu o przeprowadzone w tej części *fazy II* dokładne analizy zasad 7 gatunków zwierząt – karty nr 1-7 – i 6 gatunków roślin – karty nr 8-13 – opracowana została taksonomia prezentowana w tabeli 5-6. Zestawiono w niej najbardziej istotne dane, które umożliwiają organizmom realizowanie funkcji, jakimi są regulacja temperatury lub ochrona przed promieniowaniem słonecznym. W *fazie III* zebrane w tabeli 5-6 informacje służą następnie jako wskazówki przy tworzeniu koncepcji rozwiązań inspirowanych naturą.

		<i>Camelus dromedarius</i>	<i>Cataglyphis bombycina</i>	<i>Dromaius novaehollandiae</i>	<i>Loxodonta africana</i>	<i>Oryx leucoryx</i>	<i>Ovis aries, Awassi</i>	<i>Struthio camelus</i>	<i>Carnegiea gigantea</i>	<i>Ceanothus crassifolius</i>	<i>Cylindropuntia bigelovii</i>	<i>Encelia farinosa</i>	<i>Ferocactus wislizenii</i>	<i>Simmondsia chinensis</i>	
zbiór	flora								•	•	•	•	•	•	
	fauna	•	•	•	•	•	•	•							
tryb	nocny / fotosynteza CAM				•				•		•		•		
	dzienny / fotosynteza C <sub>3</sub>	•	•	•	•	•	•	•		•		•		•	
funk.	regulacja temperatury	•			•	•	•	•							
	ochrona przed prom.		•	•						•	•	•	•	•	
powłoka	rodzaj pokrywy	runo	włoski	pióra			runo	pióra	kolce	liście	kolce	liście	kolce	liście	
	barwa	jasna	srebrna	ciemna			jasna	ciemna	jasna	jasna	jasna	jasna	jasna	jasna	
	grubość pokrywy	≤10 cm	<50 μm	45 mm			5-8 cm		2,5-5 cm	1-3,5 cm	≤2,5 cm	2,5 cm	3,8-5 cm	2-4 cm	
<b>regulacja temperatury</b>															
izolacja	warstwa z zatrzymanych cząstek powietrza	•	•				•		•		•		•		
	ograniczenie konwekcji	•					•	•	•		•		•		
	ograniczenie kondukcji	•		•			•	•							
ciepłota	max. amplituda temp. między warstwami	30°C					10°C								
	amplituda wahań temperatury organizmu	7°C	6°C		9°C	7°C	6°C								
heterotermia	ośrodek magazynujący ciepło	ciało			ciało	ciało			woda		woda		woda		
	chłodz. ewaporacyjne	pot		ziajanie	polew.	pot	pot	ziajanie							
chłodzenie	próg aktywacji temp. ciała/otoczenia	40°C			21°C	46°C	40°C								
	wybiórcze chłodz. mózgu	Tc			To	Tc	To								
	kontrol. przepływ krwi – kondukcja i radiacja				okna termal.										
	ruch powietrza – chłodz. konwekcyjne	•		•	wachl. uszami		•	•							
<b>ochrona przed promieniow.</b>															
odbijanie	odbijanie promieniowania	•	•	17%			•		•	•	•	54/84%	•	•	
	zakres odbij. prom. [μm]		0,4-1,5									0,4-3			
	powłoka refleksyjna	łuski	rowki				łuski		wosk		wosk	włoski	wosk	wosk	
	grubość powłoki		66 nm									0,1-0,3 mm			
unikanie	rozpraszanie Mie		•												
	całkowite odbicie wew.		•												
	samozacienianie	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	regul. wielk. eksp. pow.						•	•	•	•	•	•	•	•	
pochł.	zmiana orientacji									liście	ramiona			liście	
	orientacja w kierunku Pd					•							•	•	
	chowanie się w cieniu														
	absorbpcja promieniow.			83%				•				46/16%			
zmiana rodzaju pokrywy	głębokość penetracji			5 mm				mała							
	zmiana rodzaju pokrywy											•			

Tab. 5-6 Taksonomia wybranych organizmów ze wskazaniem dominującej funkcji. Opracowanie własne.









# 6

## Projektowanie

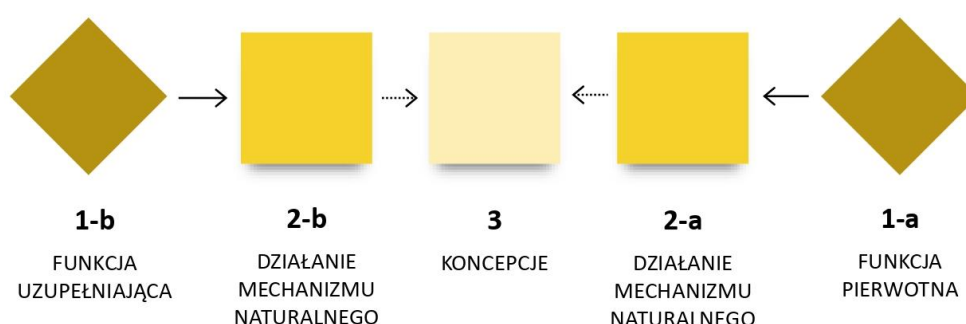
Rozwiązania inspirowane naturą

## 6 PROJEKTOWANIE

W *fazie III* określanej jako „tworzenie” w procesie projektowania opartego na biomimikrze przeprowadzono tzw. „burzę mózgów”. Rysunek 6-1 przedstawia schemat matrycy procesu, podczas gdy rysunek 6-2 prezentuje jego efekty. W rozdziale 5.2 zaprezentowano mechanizmy adaptacyjne wybranych organizmów oraz stworzoną na ich podstawie klasyfikację (patrz: Tab. 5-6). W oparciu o karty naturalnych wzorców projektowych opracowano koncepcje rozwiązań inspirowanych naturą (patrz: Rozdz. 5.2.4). Są to luźne pomysły, których zadaniem jest inspiracja do tworzenia bardziej szczegółowych rozwiązań. Osiem z tych koncepcji zilustrowano i opisano, a następnie wskazano ich możliwości i ograniczenia. Najbardziej obiecujące koncepcje zostały poddane dalszemu rozwojowi, w efekcie czego opracowane zostały trzy rozwiązania uszczegółowione. W *fazie IV* poddano je ewaluacji (patrz: Zał. 1, Zał.2, Zał. 3), którą przedstawiono w rozdziale 6.2.

### 6.1 FAZA III | TWORZENIE

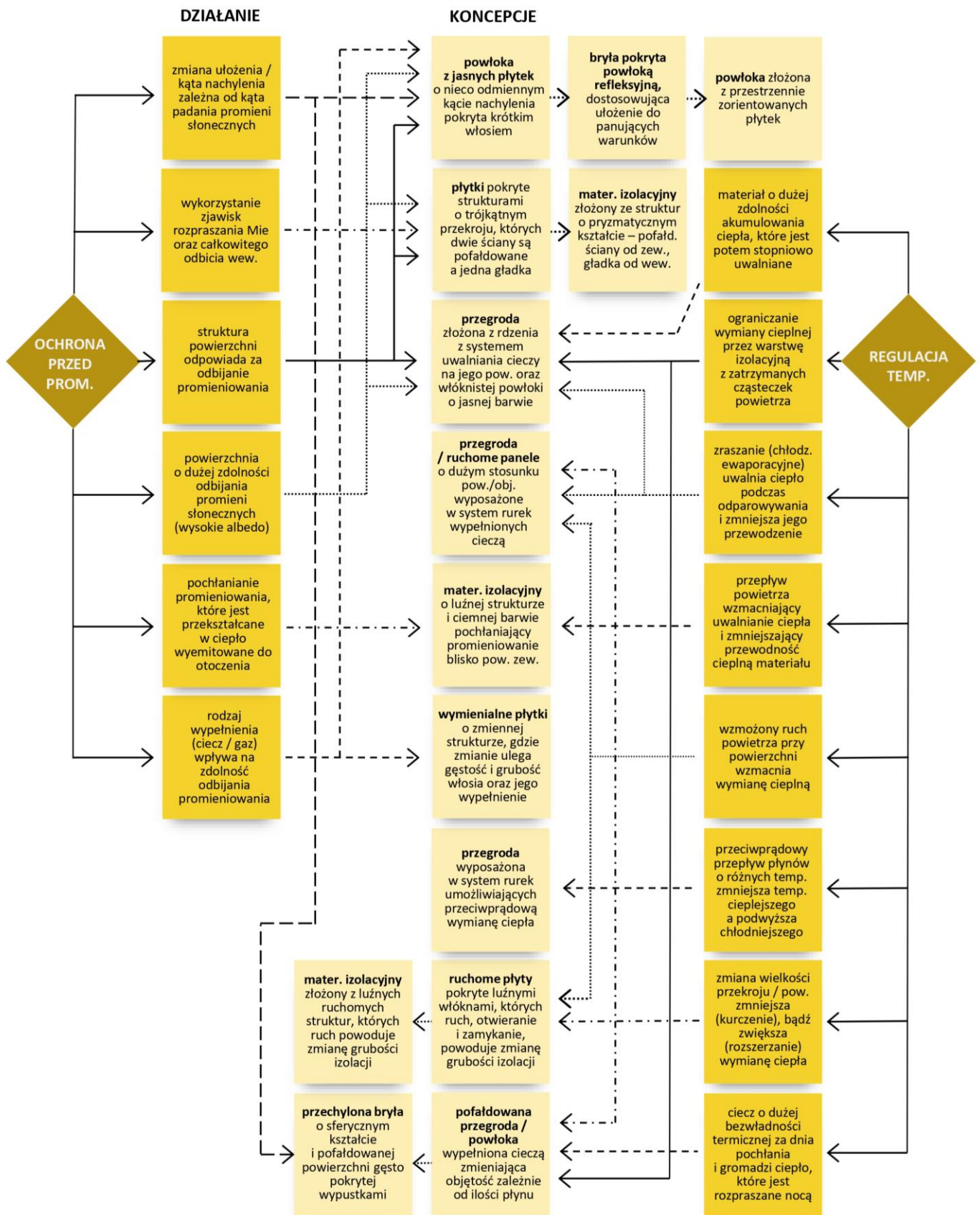
Stosowana na początku *fazy III* „burza mózgów” to technika kreatywnego myślenia służąca do opracowywania nowych pomysłów i rozwiązywania problemów. Jest ona często wykorzystywana przez zespoły projektowe do generowania pomysłów na jasno określone zagadnienia lub wyzwania projektowe. Burza mózgów angażuje grupę osób (w opisywanym przypadku grupę stanowili autorka oraz współuczestnicy studiów magisterskich z biomimikry prowadzonych na College of Global Futures na ASU<sup>20</sup>), które swobodnie wyrażają swoje myśli i sugestie bez krytyki i osądzania, dążąc do przewagi ilości nad jakością. Celem burzy mózgów jest zbadanie różnych perspektyw i możliwości oraz wzajemne rozwijanie pomysłów w celu znalezienia potencjalnych rozwiązań. W opisywanym przypadku burzę mózgów przeprowadzono za pomocą diagramów, szkiców oraz narzędzi online.



Rys. 6-1 Schemat prezentujący matrycę procesu „burzy mózgów”. Opracowanie własne.

<sup>20</sup> Arizona State University

### 6.1.1 PROPONOWANE KONCEPCJE INSPIROWANE NATURĄ



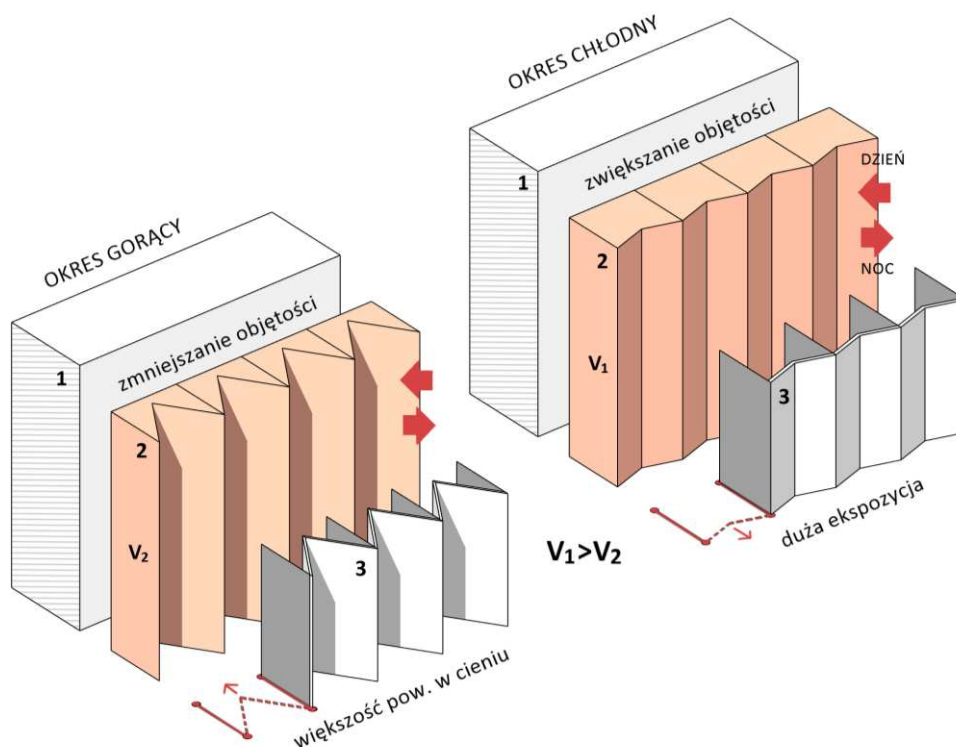
Rys. 6-2 Schemat prezentujący efekty procesu myślowego towarzyszącego tworzeniu rozwiązania inspirowanego naturą. Opracowanie własne.

Opis | Typ systemu: pasywny

Projektowana przegroda (patrz: Rys. 6-3) składa się z 3 warstw: [1] konstrukcji nośnej, [2] warstwy akumulacyjnej, poddającej się odkształceniom sprężystym oraz [3] powłoki, która zmienia kształt pod wpływem odkształceń warstwy nr 2 – zaznaczono na czerwono. Zmiana kształtu powłoki zewnętrznej pozwala na regulowanie wielkości powierzchni poddawanej bezpośrednio działaniu promieniowania słonecznego. Warstwa akumulacyjna odpowiada zaś za magazynowanie energii cieplnej w ciągu dnia oraz uwalnianie jej w trakcie nocy.

Powłoka przegrody [3] składa się z elastycznych modułów, które ograniczone są przez trzy pionowe krawędzie, dwie boczne sztywno przytwierdzone do warstwy nośnej oraz środkową – ruchomą. W zależności od zmiany temperatury objętość warstwy akumulacyjnej zostaje zmieniona. W efekcie, środkowa krawędź modułu zewnętrznego przesuwana się w kierunku części nośnej ściany (do wnętrza budynku) lub na zewnątrz, w zależności od zmiany objętości warstwy akumulacyjnej. Intuicyjnie, objętość tej warstwy zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury (rozszerza się pod wpływem temperatury) i spada przy jej spadku. W naturze – w przypadku np. kaktusa – mechanizm jest analogiczny, ale warstwa akumulacyjna traci objętość pod wpływem temperatury przez parowanie wody do otoczenia, a zyskuje, kiedy roślina pobiera wodę.

Mechanizm ten powoduje mocne pożałdowanie powłoki przy wzroście temperatury, dzięki temu znaczna część zewnętrznej powierzchni przegrody [3] znajduje się we własnym cieniu. W porze chłodnej (w naturze bardziej obfitującej w wodę), objętość warstwy akumulacyjnej ulega zwiększeniu, co z kolei powoduje przesunięcie środkowej krawędzi modułów na zewnątrz. Dzięki temu większa powierzchnia przegrody zostaje wyeksponowana na bezpośrednie działanie promieni słonecznych, co umożliwia jej efektywne nagrzewanie i przekazywanie ciepła do warstwy akumulacyjnej.

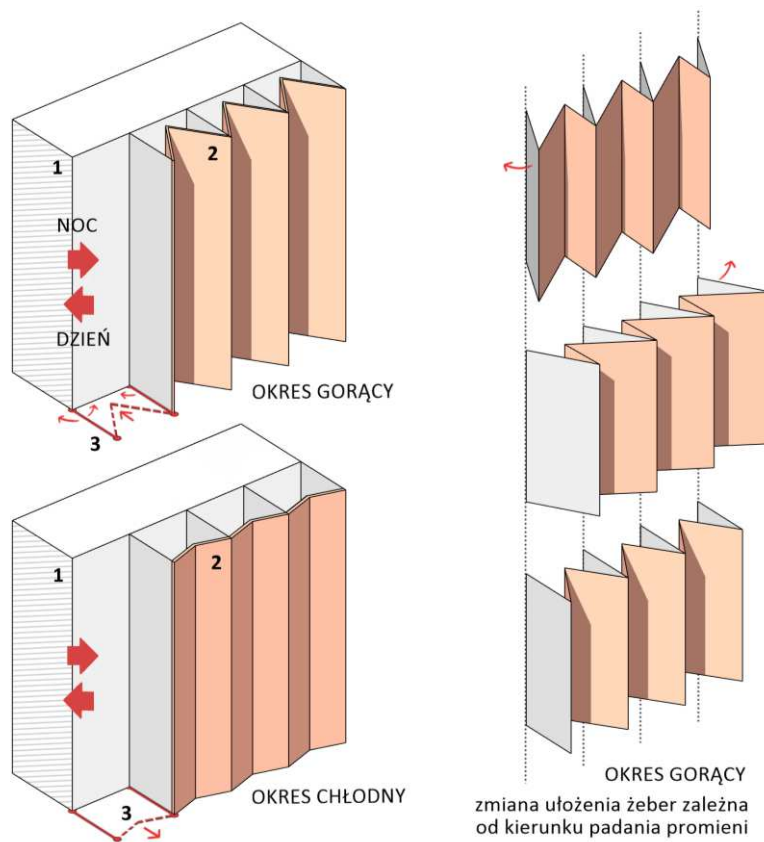


Rys. 6-3 Ilustracja koncepcji projektowanego systemu inspirowanego mechanizmami adaptacyjnymi karnegii olbrzymiej i ferokaktusa. Opracowanie własne.

Opis | Typ systemu: aktywny (wymaga zewnętrznego sterowania)

Projektowana koncepcja przegrody (patrz: Rys. 6-4) składa się z rdzenia wykonanego z materiału o dużej zdolności do magazynowania ciepła [1] oraz powłoki zewnętrznej [2], która wyposażona jest w system kinetyczny przymocowany do warstwy nośnej. System ten poprzez dostosowywanie kształtu powłoki do warunków panujących na zewnątrz odpowiada za regulację ilości powierzchni wystawionej na bezpośrednie działanie promieniowania słonecznego. Zadaniem rdzenia jest natomiast gromadzenie ciepła w ciągu dnia oraz stopniowe uwalnianie go w trakcie nocy. Przegroda wyposażona jest także w czujniki, które monitorują temperaturę przegrody.

Znajdujący się od zewnątrz system kinetyczny [3] złożony jest z pojedynczych modułów łączych ze sobą w ciągłą powłokę. Każdy moduł posiada trzy krawędzie – dwie boczne przytwierdzone do konstrukcji nośnej, które zmieniają położenie w zależności od kierunku padania promieni słonecznych oraz środkową, która się przemieszcza w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny przegrody. W ten sposób system „odzworowuje” ruch żeber kaktusów. W okresie chłodnym, gdy promieniowanie jest słabe, środkowa krawędź modułów jest jedynie lekko cofnięta w stosunku do pozostałych. Dzięki temu znaczna część powierzchni powłoki jest wystawiona na bezpośrednie działanie promieni słonecznych, co powoduje jej nagrzewanie. W okresie gorącym natomiast, mechanizm sterujący, po otrzymaniu sygnału z czujników, cofa środkową krawędź modułu do wewnątrz. Tym samym powierzchnia powłoki ulega mocnemu pożałdowaniu, w efekcie czego większa jej część znajduje się w cieniu. Ponadto krawędzie boczne przesuwają się w lewo, bądź prawo, powodując wystawienie czoła krawędzi w kierunku padania promieni słonecznych, co dodatkowo ogranicza ekspozycję powierzchnię. Szczegółowy projekt systemu kinetycznego, który obsługuje tę koncepcję nie jest opracowywany na tym etapie procesu projektowego.

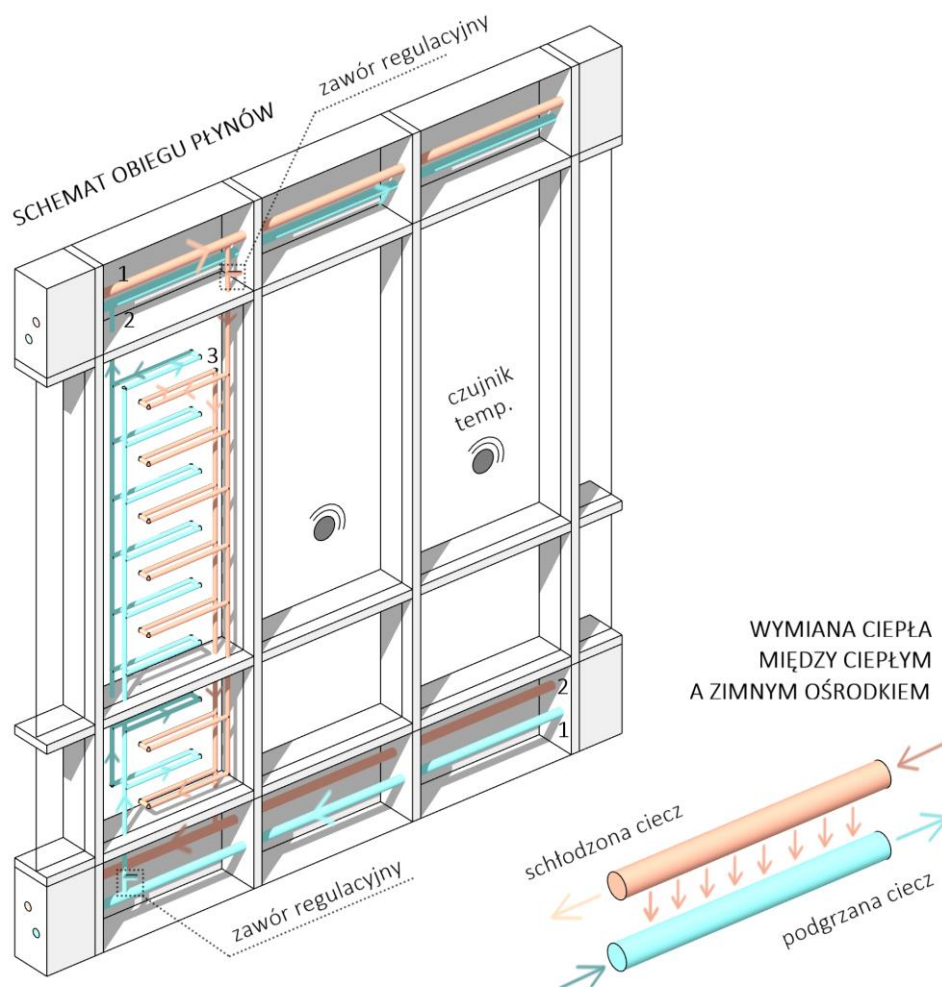


Rys. 6-4 Ilustracja koncepcji projektowanego systemu inspirowanego mechanizmami adaptacyjnymi karnegii olbrzymiej i cylindropuncji. Opracowanie własne.

Opis | Typ systemu: aktywny (wymaga zewnętrznego sterowania)

Proponowana koncepcja (patrz: Rys. 6-5) stanowi spójny system hydrauliczny, składający się z wielu niezależnych segmentów rozmieszczonych na przegrodzie, które podłączone są do centralnego obiegu cieczy. W proponowanym systemie hydraulicznym ciecz służy do przekazywania ciepła. Pojedynczy segment tworzą dwa niezależne obwody rur. Każdy obwód składa się z rury zasilającej [1], rury odprowadzającej [2] oraz wymiennika, który ma postać cienkich rurek ustawionych w pętłach [3]. Obwody są wyposażone w sterowane centralnie zawory regulacyjne. Zawór regulacyjny otwiera się, bądź zamyka w zależności od sygnałów wysyłanych przez czujniki, umożliwiając lub blokując przepływ cieczy przez system. Przeciwnie biegnące do siebie rurki wymienników wypełnione cieczami o różnych temperaturach, cieplej i chłodnej, tworzą warunki do ich wzajemnego oddziaływania. Dzięki przeciwnieprądowemu przepływowi cieczy dochodzi do wymiany ciepła pomiędzy cieplejszym i chłodniejszym ośrodkiem, w efekcie której temperatura cieplejszego płynu zostaje obniżona a chłodniejszego podwyższona.

Poszczególne segmenty systemu mogą być stosowane na powierzchniach różnych przegród, czy też mogą stanowić integralną część przeszkleń, regulując temperaturę. Temperatura cieczy, monitorowana jest za pomocą czujników, a cały system uruchamiany jest dopiero w momencie, gdy przekroczy ona ustaloną wartość graniczną.



Rys. 6-5 Ilustracja koncepcji działania projektowanego rozwiązania inspirowanego mechanizmem adaptacyjnym oryksa południowego. Opracowanie własne.

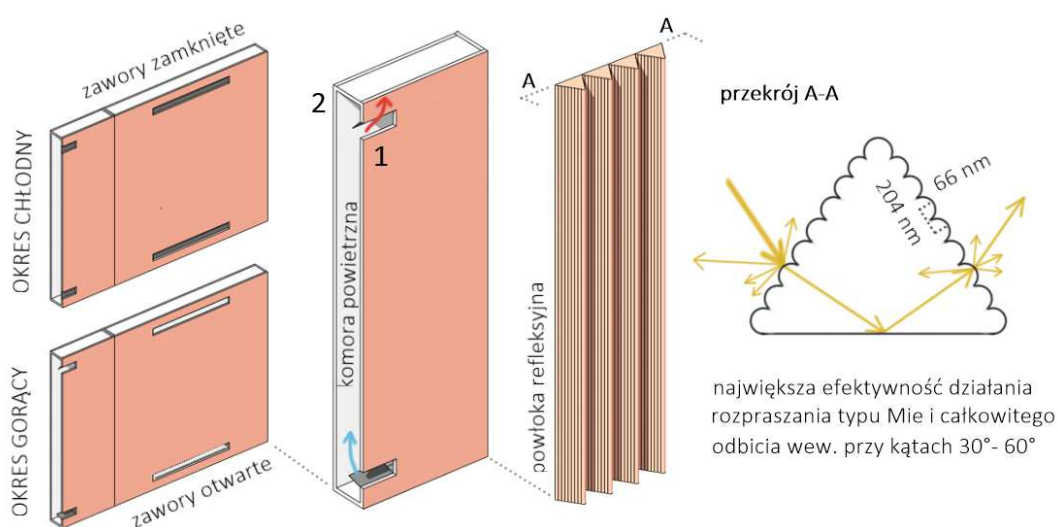


Opis | Typ systemu: aktywny (wymaga zewnętrznego sterowania)

Projektowana koncepcja (patrz: Rys. 6-6) składa się z modułowych płytek o wymiarach 10×10 cm, których zadaniem jest ochrona przegrody przed promieniowaniem słonecznym, a tym samym zapobieganie jej nadmiernemu nagrzewaniu. Pojedyncza płytka składa się z trzech warstw: zewnętrznej [1] wewnętrznej [2], oraz pustki w środku, która wypełniona jest powietrzem. Elementy te tworzą zamkniętą szczelną płaską komorę powietrzną, wyposażoną w elektrozawory, które są sterowane przez centralny system regulacji. Elastyczny materiał, z którego wykonana jest płytka umożliwia dopasowywanie ich do różnych struktur i kształtów powierzchni, do której system płytek jest montowany.

Ruch zaworów sterowany jest sygnałami wysyłanymi z czujników, mierzących temperaturę powietrza. Swobodny przepływ powietrza pozwala na chłodzenie warstwy zewnętrznej w wyniku konwekcji, która ma miejsce w komorze powietrznej. W okresie chłodnym ciemna barwa warstwy zewnętrznej pochłania część promieniowania, które przekształcane jest w ciepło, powietrze znajdujące się w komorze powietrznej nagrzewa się. W ten sposób zmniejsza się gradient temperatury pomiędzy wnętrzem pomieszczenia a powłoką wykonaną z płytek, co wpływa na zmniejszenie transferu ciepła. Płytki spowalniają utratę ciepła przez przegrodę, zapobiegając szybkiemu wychładzaniu budynków.

Proponowana koncepcja przypomina w sposobie działania elewację wentylowaną lub podwójną fasadę. Jej działanie jest natomiast wspomagane przez dodatkową pokrywą. Zbudowana jest ona z grubej warstwy włókien pustych wewnątrz, które imitują włosy saharyjskiej srebrnej mrówki. Poszczególne włókna o pryzmatycznym przekroju posiadają trzy ściany. Gładką ułożoną na płasko wzdłuż powierzchni płytki oraz dwie zewnętrzne pokryte fałdami. Rozstawione co 204 nm rowki, biegnące skośnie do osi podłużnej włókien, osiągają głębokość 66 nm. Taka budowa umożliwia nanostrukturze rozpraszanie promieni słonecznych w zakresie światła widzialnego (0,4-0,75 μm) oraz bliskiej podczerwieni (0,75-1,5 μm). Część promieniowania, która przedostaje się do wnętrza włókien ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu. Efektywność tych zjawisk jest szczególnie wysoka przy pośrednich kątach padania (od 30° do 60°).

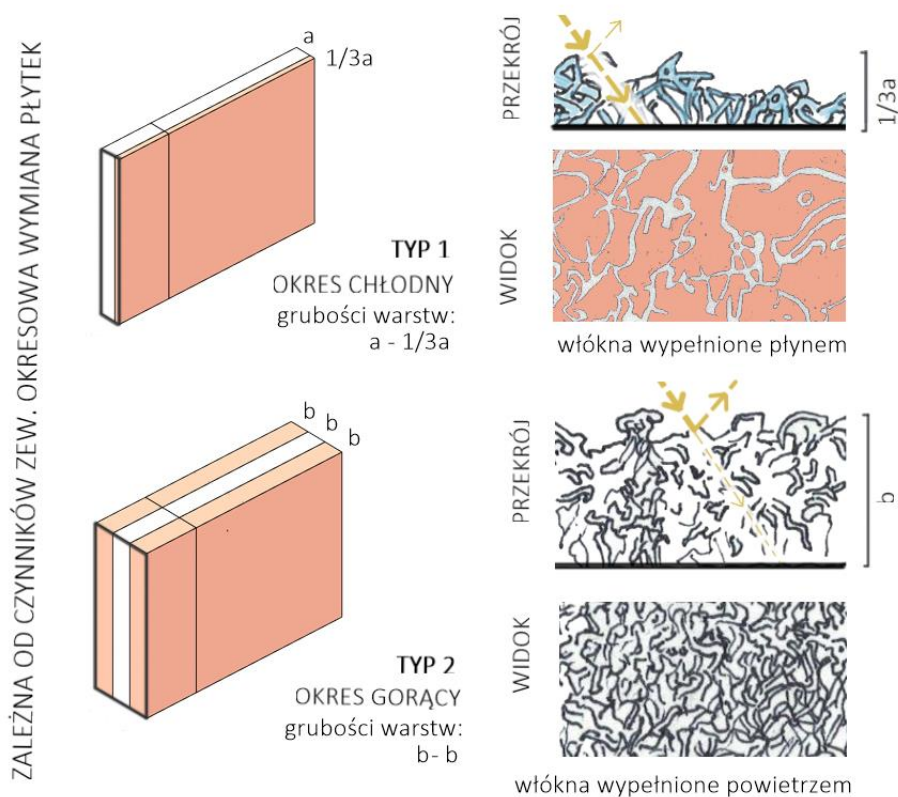


Rys. 6-6 Ilustracja koncepcji budowy i działania projektowanych płytek inspirowanych mechanizmami adaptacyjnymi saharyjskiej srebrnej mrówki i simondsji kalifornijskiej. Opracowanie własne.

**Opis | Typ systemu:** sezonowo pasywny (wymaga sezonowej wymiany)

Projektowaną koncepcję tworzą modułowe płytki o wymiarach 10×10 cm (patrz: Rys. 6-7), podlegające okresowym wymianom zależnym od czynników zewnętrznych: (i) wilgotności powietrza, (ii) intensywności promieniowania, (iii) temperatury. Niewielkie rozmiary płytek oraz elastyczny materiał, z którego wykonany został ich rdzeń umożliwiają montowanie płytek do powierzchni o różnych kształtach. Ciemna barwa rdzenia pozwala na akumulowanie ciepła, tworząc izolację, która spowalnia uwalnianie ciepła w okresach chłodnych. W koncepcji założono, że zostaną wdrożone 2 wymienne typy płytek. Ich cykliczna wymiana pozwala modyfikować ilość pochłanianej energii, a tym samym regulować temperaturę powierzchni płytek.

W **typie 1** zewnętrzną warstwę płytek stanowią włókna, które przypominają włosy wytwarzane na liściach przez krzew o nazwie *Encelia farinosa*. W zależności od warunków zewnętrznych ich budowa będzie inna. W okresie, w którym dominują wysoka wilgotność i słabe promieniowanie na przegrodzie montowane są płytki z pokrywą, znajdującą się jedynie po zewnętrznej stronie rdzenia. Pokrywą tę tworzą rzadko rozmieszczone, jasne włókna wypełnione płynem. Taka struktura pokrywy pozwala na zwiększenie ilości pochłanianej energii promieniowania, a tym samym nagrzewanie powierzchni rdzenia. Wraz ze wzrostem intensywności promieniowania oraz spadkiem wilgotności płytki są stopniowo wymieniane. Płytki **typu 2** mają pokrywą z obu stron. Zmianie ulega jej grubość, która jest trzy razy większa w stosunku do włókna w typie 1 oraz zagęszczenie tworzących ją włókien. Nowe bardzo długie i poskręcane włókna całkowicie zakrywają powierzchnię rdzenia. Ponadto znajdujące się wewnątrz włókien powietrze, ogranicza ilość pochłanianej energii promieniowania podczerwonego w zakresie 0,7-3  $\mu\text{m}$ , co zapobiega nagrzewaniu się rdzenia płytek.

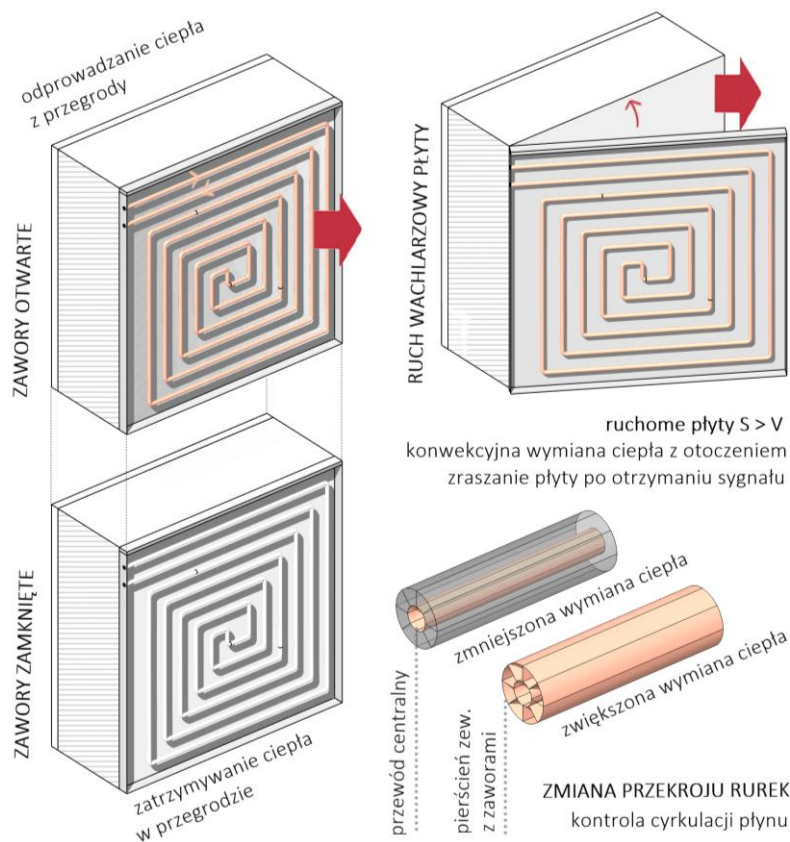


**Rys. 6-7** Ilustracja koncepcji budowy i działania projektowanych płytek inspirowanych mechanizmem adaptacyjnym *Encelii farinosy*. Opracowanie własne.

Opis | Typ systemu: aktywny (wymaga zewnętrznego sterowania)

W proponowanej koncepcji obudowę fasady stanowią wodoodporne płyty o wym. 100×100 cm o jasnej barwie i grubości 3 cm wykonane z elastycznego tworzywa (np. gumy/silikonu/tworzywa z recyklingu) (patrz: Rys. 6-8). Wymiary płyty zapewniają maksymalną powierzchnię wymiany ciepła przy zachowaniu minimalnej objętości, pochłaniającej energię cieplną (niską bezwładność cieplną). Proporcje te wynikają z analizy morfologicznej uszu słonia afrykańskiego, który w swoim środowisku narażony jest na duży stres cieplny. Modułowe płyty montowane są na elewacji, na niezależnym stelażu, który umożliwi ruch obrotowy płyt wokół osi pionowej. Każda płyta wyposażona jest w wymiennik ciepła w postaci obwodu złożonego z rurek, przez które przepływa płyn, odprowadzający ciepło z przegrody. Pojedyncza rurka w przekroju składa się z centralnego przewodu oraz podzielonego na segmenty zewnętrznego pierścienia. Zmiana jej przekroju możliwa jest dzięki otwieraniu, bądź zamykaniu znajdujących się w poszczególnych segmentach pierścienia zaworów, które odpowiednio blokują albo umożliwiają przepływ cieczy. Regulacja cyrkulacji wpływa zatem na zmniejszoną lub zwiększoną powierzchnię wymiany ciepła z otoczeniem, która zachodzi w wyniku promieniowania i przewodzenia. Nie da się tego efektu osiągnąć przez regulację prędkości przepływu, ponieważ wtedy nie zmienia się powierzchnia wymiany ciepła z otoczeniem.

Przy wysokiej temperaturze otoczenia, uruchamiany jest mechanizm zraszający zewnętrzną powierzchnię płyt. Chłodna szara woda dostarczana jest do każdej z płyt osobnym przewodem. Następnie płyty wprawiane są w ruch wachlarzowy wokół osi pionowej. Ruch ten przyczynia się do powstawania chłodzących prądów powietrznych, które wspomagają wymianę ciepła w trakcie wzmożonej cyrkulacji płynów wewnątrz rurek. Mechanizm ten zatrzymywany jest w momencie, gdy płyty oraz przegroda osiągną optymalną temperaturę.



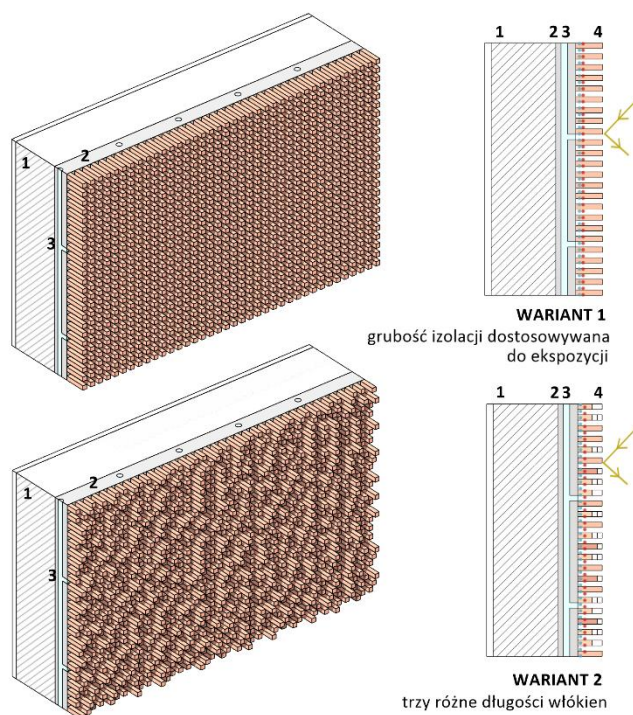
Rys. 6-8 Ilustracja koncepcji działania projektowanego rozwiązania inspirowana mechanizmem adaptacyjnym słonia afrykańskiego. Opracowanie własne.

Opis | Typ systemu: okresowo aktywny

W proponowanej koncepcji (patrz: Rys. 6-9) warstwę nośną tworzy rdzeń o dużej zdolności magazynowania ciepła [1]. Podczas dnia akumuluje on ciepło, które stopniowo uwalnia do otoczenia w ciągu nocy. Z zewnątrz pokrywa go gruba warstwa tynku glinianego [2], w którym zatopiony jest system gęsto rozmieszczonych, cienkich rurek zakończonych zraszaczami [3]. Tynk ten stanowi dodatkową warstwę akumulacyjną oraz odpowiada za regulowanie wilgotności przegrody, pochłaniając nadmiar ewentualnej wilgoci. Na powierzchni rdzenia znajdują się czujniki, które monitorują jego temperaturę. Zewnętrzną warstwę przegrody [4] stanowi modułowa izolacja składająca się z jasnych włókien, która występuje w 2 wariantach. W zależności od wariantu włókna te pod względem geometrycznym imitują sierść wielbłąda, bądź runo owcy Awassii.

1. W pierwszym wariantcie włókna naniesione na pojedynczy moduł mają jednakową długość i strukturę, dzięki czemu w przekroju izolacji osiągnięty jest płynny gradient temperatur. Długość włókien zmienia się w zależności od orientacji fasady. Tam, gdzie oddziaływanie promieniowania jest najbardziej intensywne włókna są najdłuższe. W przypadku półkuli północnej najdłuższe włókna będą zlokalizowane na dachu oraz elewacji południowej, gdzie dociera najwięcej promieniowania.
2. W wariantcie drugim izolacja pojedynczego modułu składa się z trzech frakcji włókien, które charakteryzuje odmienna długość i struktura. Budowa ta powoduje, że izolacja najbardziej nagrzewa się w środku przekroju, chroniąc rdzeń przed wzrostem temperatury.

Niezależnie od wariantu zadaniem jasnych włókien jest odbijanie promieniowania słonecznego oraz hamowanie przepływu powietrza (jasne włókna mają większe albedo). Nieruchome powietrze, które znajduje się między włóknami tworzy bufor termiczny. Bufor ten zarówno przy niskich jak i wysokich temperaturach zapobiega utracie ciepła. Jednak gdy zostanie przekroczona pewna ustalona granicznie wysoka temperatura przegrody, uruchomiony zostaje system zraszania na powierzchni rdzenia. Zawory w rurkach otwierają się, umożliwiając stopniowy transport cieczy na powierzchnię tynku. Ciecz powoduje zwiększoną utratę ciepła przez parowanie.



Rys. 6-9 Ilustracja koncepcji projektowanej przegrody inspirowana mechanizmami adaptacyjnymi wielbłąda jednogarbnego, owcy Awassi i karnegii olbrzymiej. Opracowanie własne.

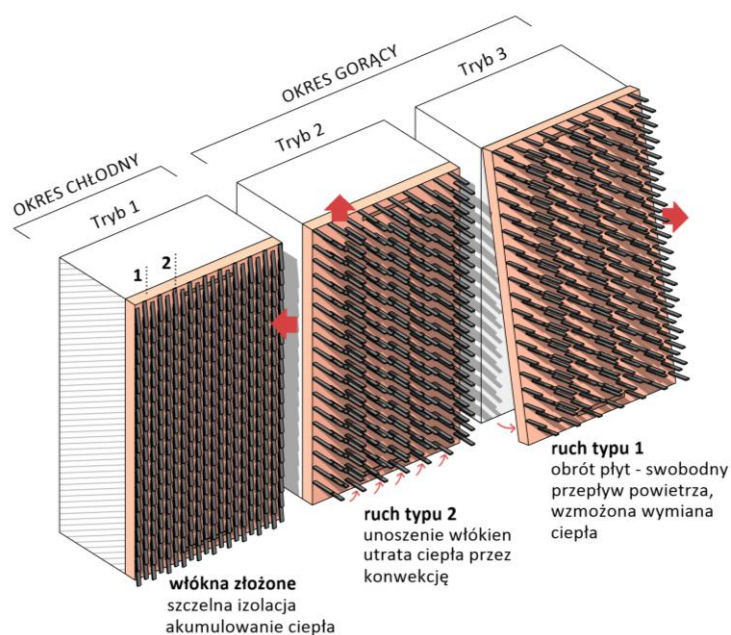
Opis | Typ systemu: aktywny (wymaga zewnętrznego sterowania)

Proponowana koncepcja (patrz: Rys. 6-10) składa się z ruchomych płyt, naśladujących ruch skrzydeł strusia. Płyty wyposażone są w przegub z jednym stopniem swobody, znajdujący się na ich górnej krawędzi. Przegub ten umożliwia obrót płyt wokół osi poziomej [ruch typu 1]. Zmiana ich położenia sterowana jest sygnałami wysyłanymi przez czujniki temperatury, znajdujące się na zewnętrznej powierzchni płyt.

Płyty [1] są pokryte włóknami o ciemnej barwie [2], imitującymi podwójne pióra emu. Mikrostruktura pióra jest odmienna niż mikrostruktura włosa, a ponadto, pióra ptaków latających są inne niż pióra nietotów (emu/struś czerwonoskóry). Mikrostruktura pióra nietotów powoduje, że poszczególne włókna nie szepiąją się ze sobą, a między nimi swobodnie krąży powietrze (nie powstaje między nimi bufor termiczny). W prezentowanej koncepcji włókna są unoszone („stroszone”), bądź ściśle przylegają do płyty [ruch typu 2].

Proponowana fasada funkcjonuje w 3 trybach.

1. **Tryb 1.** Gdy jest chłodno płyty ściśle przylegają do powierzchni przegrody, włókna również, tworząc szczelną powłokę. Ciemne włókna pochłaniają większość promieniowania słonecznego, które następnie ulega przekształceniu w akumulowaną przez płyty energię cieplną. Jedynie niewielka część tego ciepła jest uwalniana w wyniku wypromieniowania. Szczelna powłoka zatrzymuje większość ciepła a tym samym zapobiega zbyt szybkiemu wychładzaniu przegrody.
2. **Tryb 2.** Wraz ze wzrostem temperatury włókna są unoszone (dokonuje się ruch typu 2), w efekcie czego pomiędzy nimi powstają szczeliny, umożliwiające swobodny przepływ powietrza. Ciepło zgromadzone blisko powierzchni zewnętrznej włókien jest uwalniane w wyniku konwekcyjnej wymiany ciepła.
3. **Tryb 3.** Chłodzenie może być dodatkowo wzmożone poprzez falujący ruch płyt (dokonuje się ruch typu 1), które zacieniają przegrodę i wymuszają cyrkulację powietrza. Ich unoszenie wpływa bowiem na zwiększenie przepływu powietrza bezpośrednio przy rdzeniu. Mechanizm ten powoduje wzmocnienie efektu konwekcyjnej wymiany ciepła, dzięki czemu energia cieplna zgromadzona w przegrodzie może być szybciej uwalniana.



Rys. 6-10 Ilustracja koncepcji projektowanych płyt inspirowanych mechanizmami adaptacyjnymi strusia czerwonoskórego i emu. Opracowanie własne.

## 6.1.2 ZAWĘŻENIE WYBORU

Rozpatrując rozważane w tabeli 6-1 kryteria wyboru, autorka zdecydowała się na dalsze rozwijanie koncepcji rozwiązań nr **1, 2, 8**. Wybory te podyktowane zostały różnymi aspektami. Po pierwsze działanie wybranych rozwiązań nie zakłada wykorzystania płynów. Tym samym pozwala to uniknąć wielu problemów, jakie mogą pojawić się w budynkach w wyniku awarii, czy nieszczelności systemów. Ponadto wydaje się, że byłoby to również niewłaściwe w odniesieniu do projektowania rozwiązań, które tworzone są w kontekście środowiska niemal pozbawionego dostępu do wody. Drugim czynnikiem eliminacyjnym było zastosowanie nano- i mikrostruktur budujących powłoki refleksyjne i izolacje. W przypadku tworzenia bardziej szczegółowych opisów rozwiązań, struktury te wymagają dalszych badań i analiz, aby można byłoby stworzyć ich odpowiedniki, które byłyby możliwe do wdrożenia na większą skalę. Aktualna wiedza autorki w tym zakresie jest wciąż niewystarczająca.

W trakcie pracy nad rozwiązaniami uszczegółowionymi starano się zwracać uwagę na to, aby proponowane mechanizmy zużywały jak najmniej energii elektrycznej i oparte były na zasadach działania rozwiązań pasywnych. Przyjętymi założeniami były także automatyzacja procesów, ograniczenie kosztów utrzymania i produkcji oraz eliminacja powstawania odpadów w całym cyklu życiowym produktu.

KRYTERIUM	NR ROZWIĄZANIA							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>FUNKCJA:</b>								
regulacja temperatury	●	●	●	●	●	●	●	●
ochrona przed promieniowaniem	●	●		●	●		●	●
<b>MOŻLIWOŚCI:</b>								
możliwość wdrażania: nowe (N), istniejące i nowe (IN) systemy	N	N	N	IN	IN	N	N	N
elastyczność	●	●		●	●			
modułowość	●	●	●	●	●	●		●
niewielkie rozmiary				●	●			
wykorzystanie rozwiązań pasywnych	●	●	●	●	●	●	●	●
obecność czujników temperatury	●	●	●	●		●	●	●
<b>OGRANICZENIA</b>								
płyn jako część systemu			●		●	●	●	
potrzeba regularnej wymiany					●			
obecność nano- lub mikro-struktur				●	●		●	●
zmiana objętości	●				●			
ruchome elementy	●	●	●	●		●	●	●
rodzaj mechanizmu: P – przegub, ZR – zawór		P	ZR	ZR		P	ZR	P

**Tab. 6-1** Tabela prezentująca funkcje, jak też możliwości i ograniczenia poszczególnych rozwiązań, które wpływają na ostateczny wybór przypadków poddawanych dalszemu opracowaniu. Oprac. własne.

### 6.1.3 OPIS ROZWIĄZAŃ USZCZEGÓLOWIONYCH

W tej części *fazy III* rozwojowi poddane zostały trzy wybrane koncepcje rozwiązań: nr **1**, **2**, **8**. Każde rozwiązanie uszczegółowione zawiera informacje na temat typu systemu, typu przegrody, opis budowy, działania ze wskazaniem trybów oraz ilustrację.

#### 6.1.3.1 Rozwiązanie uszczegółowione I. Szczelne komory z pompowanymi membranami

**Typ systemu:** aktywny (wymaga zewnętrznego sterowania)

**Typ przegrody:** nieprzezroczysta / przezroczysta

**Opis budowy:** W projektowanym rozwiązaniu (patrz: Rys. 6-11) konstrukcję nośną [**rdzeń – 1**] stanowi ściana z tradycyjnego materiału budowlanego o dużej zdolności do magazynowania ciepła. Duża masa akumulacyjna warstwy nośnej powoduje, że pochłania ona ciepło za dnia i stopniowo uwalnia je nocą, zmniejszając dobowe amplitudy temperatur wewnątrz budynków (ew. dodatek materiału zmiennofazowego poprawiłby zdolność akumulacji ciepła). Ściana stanowi szkielet, do którego zamontowany jest aktywny system fasadowy. Zadaniem tego systemu jest regulacja powierzchni wystawionej na bezpośrednie działanie promieni słonecznych.

Aktywny system fasadowy składa się z równo rozstawionych pionowych metalowych żeber, dzielących fasadę na szczelne, pionowe powietrzne komory [**2**] (możliwe jest również zastosowanie pionowych komór, w całości wcześniej sprefabrykowanych). Wewnętrzna powierzchnia komory pokryta jest powłoką [**3**], która sprzyja akumulacji ciepła (np. chromowa farba selektywna (279)). Od strony zewnętrznej komora jest zamknięta elastyczną membraną [**4**] (np. ETFE o jasnej, matowej barwie)<sup>21</sup>. W miejscach, w których występują przeszklenia możliwe jest stosowanie folii przezroczystych lub półprzezroczystych.

**Opis działania:** Fasada działa na zasadzie zmiany ciśnienia powietrza w komorach. Zewnętrzna membrana ulega odkształceniu. Ciśnienie w komorze jest regulowane przez system mechanicznych sprężarek. Zwiększa się lub zmniejsza, w zależności od intensywności promieniowania i temperatury mierzonych przez czujniki. Wraz ze zmianą ciśnienia zmienia się kształt membrany, a tym samym jej powierzchnia znajdująca się w cieniu. Sąsiadujące komory są ze sobą połączone, a system jest strefowany w zależności od orientacji fasady (możliwe jest w ten sposób ograniczenie liczby obsługujących system sprężarek). Przewiduje się, że sprężarki, będą zasilane energią z paneli fotowoltaicznych.

Zaproponowane rozwiązanie działa w dwóch trybach:

1. W okresie chłodnym ciśnienie wewnątrz komór jest zwiększane, co powoduje naprężenie membrany, a jej zewnętrzna płaszczyzna układa się w lekki łuk. W efekcie znaczna część powierzchni membrany wystawiona zostaje na bezpośrednie działanie promieni słonecznych, które nagrzewają znajdujące się wewnątrz powietrze (bufor). W ten sposób warstwa ta tworzy izolację termiczną, która spowalnia wychładzanie przegrody.
2. Wraz ze wzrostem intensywności promieniowania czujniki wysyłają sygnały do układu sterowania, który powoduje obniżenie ciśnienia wewnątrz komory, w wyniku czego

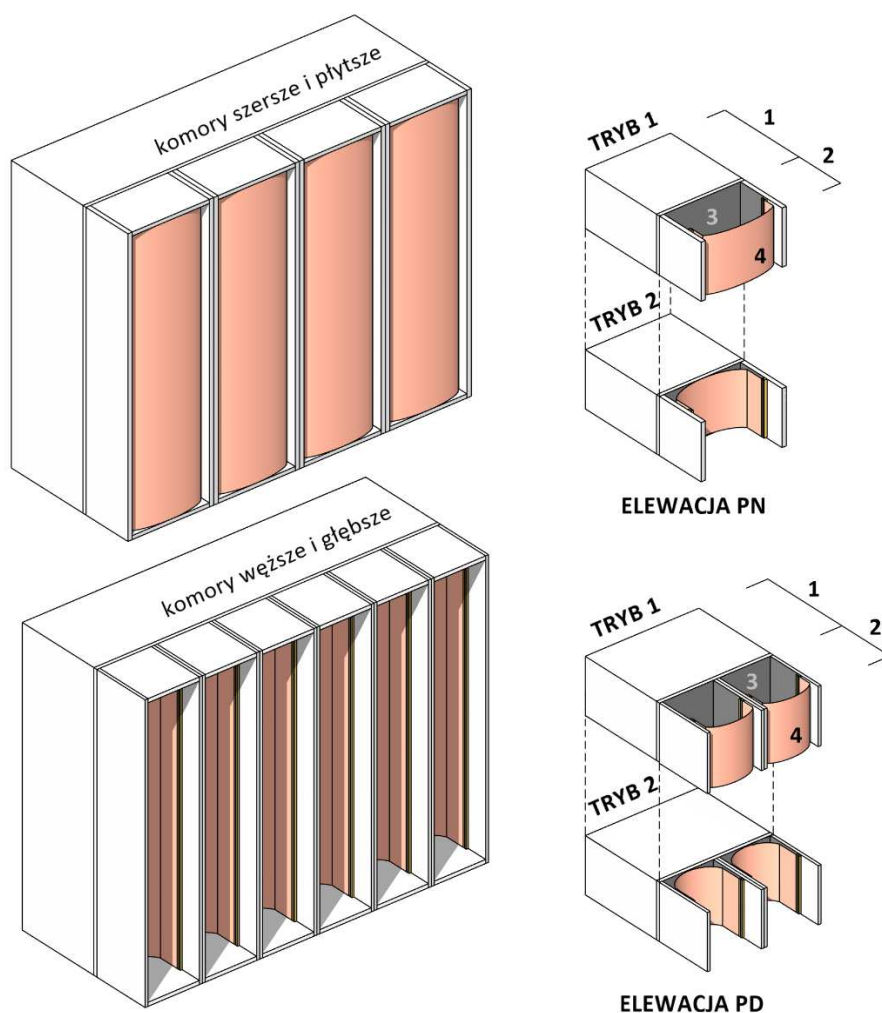
---

<sup>21</sup> ETFE to samoczyszcząca folia o dużej odporności na ekstremalne zmiany temperatury i promieniowanie UV. Ten lekki, elastyczny, wytrzymały i podlegający recyklingowi materiał wykonany jest z tworzywa sztucznego na bazie fluoru (etylen tetrafluoroetylen) (287).

membrana ugina się do wewnątrz, przylegając do ścian komory. W efekcie większa część powłoki zostaje zacieniona przez wystające żebra.

Projektowane rozwiązanie umożliwia również stosowanie innych szerokości komór, zależnie od orientacji fasady lub kąta pochYLENIA dachu. To zróżnicowanie jest inspirowane morfologią karnegii olbrzymiej, której żebra mają inne proporcje od strony nasłonecznionej i tej, która znajduje się zawsze w cieniu. W projektowanym systemie komory, które znajdują się od strony południowej są węższe i głębsze, co pozwala na bardziej skuteczne zacienianie. Natomiast te od strony północnej są szersze i płytsze. Możliwe jest również zrealizowanie systemu w oparciu o komorę w całości wykonaną z membran, jednak takie rozwiązanie ograniczy możliwość akumulacji ciepła w przegrodzie.

### Ilustracja prezentująca koncepcję działania rozwiązania I



Rys. 6-11 Ilustracja prezentująca koncepcję działania rozwiązania I.  
Opracowanie własne.



### 6.1.3.2 Rozwiązanie uszczegółowione II. Fasada kinetyczna pokryta tkaniną techniczną

**Typ systemu:** aktywny (wymaga zewnętrznego sterowania)

**Typ przegrody:** nieprzezroczysta

**Opis budowy:** Projektowane rozwiązanie (patrz: Rys. 6-12) składa się z konstrukcji nośnej [1] i przymocowanego od zewnątrz systemu kinetycznego (adaptowalnego) [2]. Warstwa nośna wykonana jest z konwencjonalnego materiału o dużej zdolności do akumulowania ciepła, połączonego z materiałem zmiennofazowym, który poprawia jego bezwładność termiczną (np. w postaci drobnych kapsułek dodanych do masy betonowej). Duża masa akumulacyjna materiału umożliwia gromadzenie ciepła w ciągu dnia oraz powolne uwalnianie go nocą, zmniejszając tym samym dobowe amplitudy temperatur wewnątrz budynku.

Zadaniem zewnętrznego systemu kinetycznego jest regulowanie ilości promieniowania, które dociera do wnętrza przegrody, a tym samym wpływanie na regulację jej temperatury. Możliwe jest to dzięki dostosowywaniu kształtu powłoki do warunków środowiska zewnętrznego. Cały system sterowany jest przez oprogramowanie, które analizuje otrzymane z czujników dane dotyczące nasłonecznienia i temperatury. Energia potrzebna do zasilenia systemu wytwarzana jest przez panele słoneczne montowane w obrębie budynku.

System kinetyczny składa się z pojedynczych pionowych modułów, które w przekroju poziomym (rzucie) tworzą nieregularny pięciokąt. Trzy ściany modułu: tylna i dwie boczne wykonane są z metalowej, sztywnej blachy zamocowanej do konstrukcji nośnej [3]. Moduł jest zamknięty od góry i od dołu. Pozostałe dwie wykonane są z elastycznej, powlekanej tkaniny technicznej o jasnej barwie [4], zamocowanej do pionowych krawędzi blachy, oraz napiętej na pionowej rolce [5], która jest przesuwana przez dwa zestawy połączonych ze sobą siłowników<sup>22</sup> [6]. Pierwsza para siłowników, do której przymocowana jest pionowa rolka napinająca tkaninę, odpowiada za ruch do wewnątrz i na zewnątrz, podczas gdy druga para powoduje ruch w lewo lub prawo, tym samym przesuwając rolkę na boki i zmieniając ułożenie tkaniny. System jest otwarty, więc cyrkulacja powietrza w poszczególnych modułach jest możliwa.

**Opis działania:** Rolą lekkiej i wytrzymałej na promieniowanie UV tkaniny technicznej jest odbijanie promieni słonecznych. Zaproponowane rozwiązanie działa w dwóch trybach.

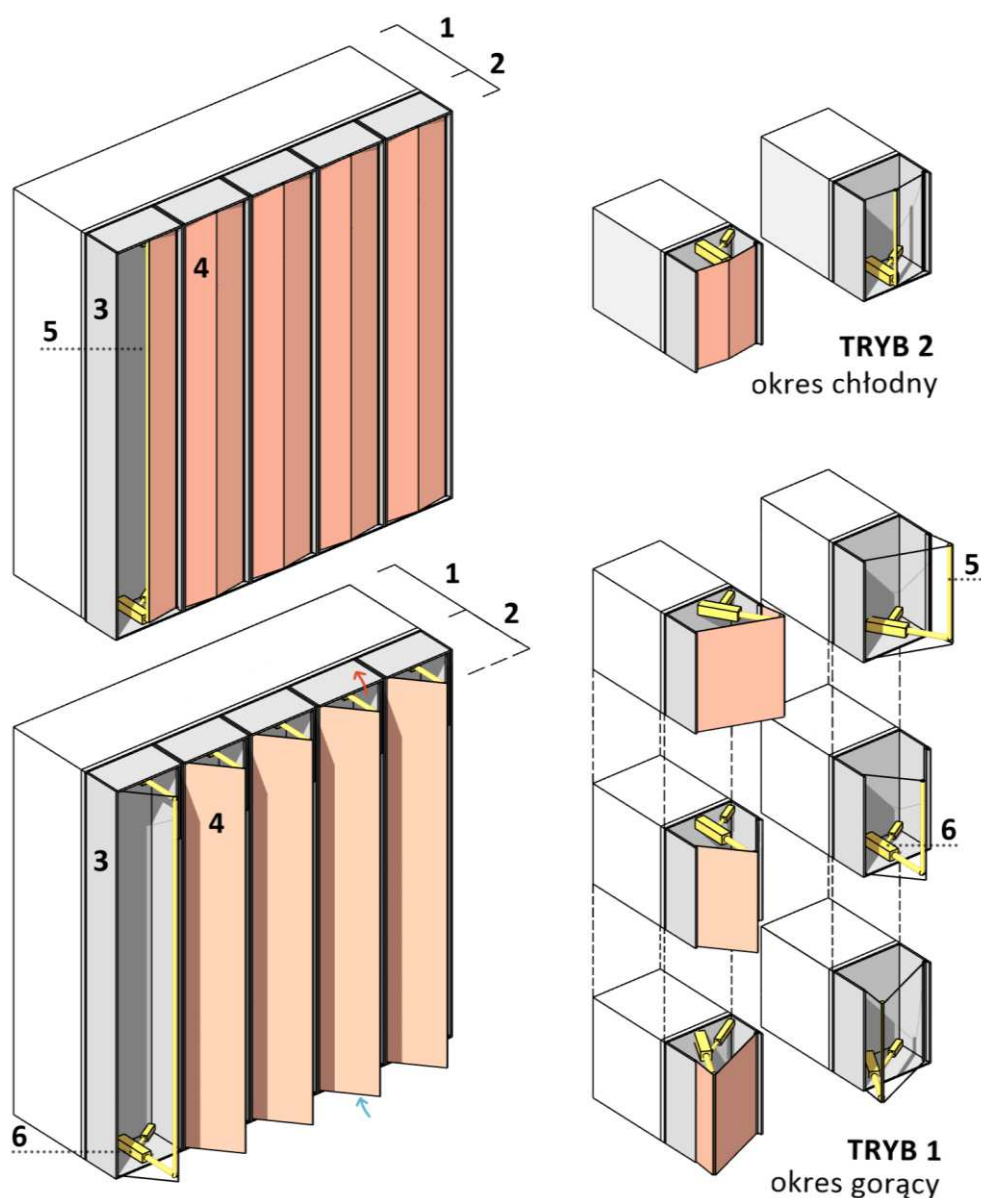
1. W okresie gorącym rolka napinająca tkaninę zostaje wysunięta na zewnątrz. Tym samym powoduje to powstanie w przekroju poziomym trójkąta ostrego, a w ogólnym odbiorze elewacji, mocno pofałdowanej powierzchni. Położenie wysuniętej na zewnątrz rolki jest dodatkowo sterowane w ciągu dnia, tak aby wierzchołek trójkąta był skierowany w stronę padania promieni słonecznych. W ten sposób większość powierzchni membrany znajduje się w cieniu, co ogranicza ilość pochłanianego przez nią promieniowania, a fasada kinetyczna może się dostosowywać w ciągu dnia do zmieniającego się kąta padania promieni słonecznych. Ponieważ rolka wysuwa się na zewnątrz, między górną/dolną krawędzią modułu a membraną tworzą się szpary wentylacyjne. Dzięki swobodnemu przepływowi powietrza wewnątrz modułu nagrzane powietrze jest usuwane i zastępowane powietrzem o niższej temperaturze.

---

<sup>22</sup> Każdy zestaw składa się z siłownika jednostronnego działania oraz połączonego z nim siłownika dwustronnego działania.

2. Wraz z sezonowymi spadkami temperatur rolka napinająca membranę jest cofana do wnętrza modułu, w efekcie czego zewnętrzna powierzchnia elewacji zostaje wypłaszczona. Szpary wentylacyjne zostają zamknięte. Większa ekspozycja powierzchni zewnętrznej membrany na promieniowanie słoneczne, powoduje jej sprawniejsze nagrzewanie, podobnie jak znajdującej się za nią warstwy nieruchomego powietrza. W ten sposób stworzona zostaje warstwa buforowa, powodująca sprawniejszą akumulację ciepła wewnątrz przegrody.

**Ilustracja prezentująca koncepcję działania rozwiązania II:**



Rys. 6-12 Ilustracja prezentująca koncepcję działania rozwiązania II.  
Opracowanie własne.

### 6.1.3.3 Rozwiązanie uszczegółowione III. Komory powietrzne pokryte paskami z termobimetalu

**Typ systemu:** pasywny

**Typ przegrody:** nieprzezroczysta

**Opis budowy:** Projektowane rozwiązanie (patrz: Rys. 6-13) składa się z modułowych, metalowych, perforowanych płaskich komór o wymiarach 50×100 cm, o tak dobranych proporcjach, że charakteryzuje je duża powierzchnia wymiany ciepła z otoczeniem (odpowiedni stosunek powierzchni do objętości). Jasne w barwie komory przymocowane są do warstwy nośnej o dużej zdolności akumulacji ciepła (bezwładności termicznej)<sup>23</sup>.

Komory **[1]** wyposażone są w prostokątne otwory o wymiarach 1×3,5 cm, które są zamykane paskami wykonanymi z elastycznego izolatora – materiału, który słabo przewodzi ciepło **[2]**. Każdy pasek izolatora jest zespolony z paskiem z termobimetalu<sup>24</sup> **[3]** o wymiarach 1,5×5,0 cm i ciemnej barwie. Paski te są skręcane/nitowane do zewnętrznej powierzchni komór. Z uwagi na to, że termobimetal to materiał powstały z połączenia dwóch metali o różnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej możliwe jest ich wzajemne oddziaływanie. Podczas wzrostu temperatury metal o wyższym współczynniku – warstwa czynna – szybciej zwiększa swoją długość w porównaniu do metalu o niższym współczynniku – warstwy biernej (280). Powoduje to, że pasek wykonany z termobimetalu odgina się w łuk, a w efekcie zmienia swój kształt. Element powraca do pierwotnego kształtu po spadku temperatury – jest to proces całkowicie autonomiczny.

**Opis działania:** Projektowane rozwiązanie działa w dwóch trybach:

1. Przy niskich temperaturach zewnętrznych paski bimetalu pozostają wyprostowane i izolator szczelnie zamyka perforacje komory. W komorze zostaje szczelnie zamknięta warstwa powietrza, która działa jak bufor termiczny. Wymiana ciepła zostaje ograniczona. Dzięki ciemnej barwie paski mają niskie albedo, co pozwala im na pochłanianie większości promieniowania słonecznego. Izolator stanowi dodatkową izolację cieplną komory.
2. Przy stopniowym wzroście temperatury paski izolatora zespolone z termobimetalem odginają się w kształt łuku i stopniowo otwierają perforację komory. Mechanizm ten powoduje wzmocnienie efektu konwekcyjnej wymiany ciepła, dzięki czemu energia cieplna zgromadzona w przegrodzie może być efektywniej uwalniana. Ponadto odkształcenie pasków powoduje odsłonięcie jasnej powierzchni płyt pokrytej powłoką refleksyjną. Jasną powierzchnię płyt pokrywa dodatkowo warstwa odbijająca promieniowanie, która chroni płyty przed nadmiernym działaniem promieni słonecznych. Gdy temperatura otoczenia spadnie paski powracają do pierwotnej pozycji i zamykają perforacje komory.

Dodatkowym zjawiskiem obserwowanym w naturze u emu jest pochłanianie promieniowania słonecznego blisko powierzchni zewnętrznej piór. Zjawisko to zapobiega jego transferowi do głębszych warstw przegrody. Analogicznie do tego działają ciemne paski zbudowane z termobimetalu połączonego z izolatorem. Ciemna powierzchnia pasków przyczynia się do pochłaniania promieniowania a w efekcie nagrzewania metalu. Izolator, który oddziela paski

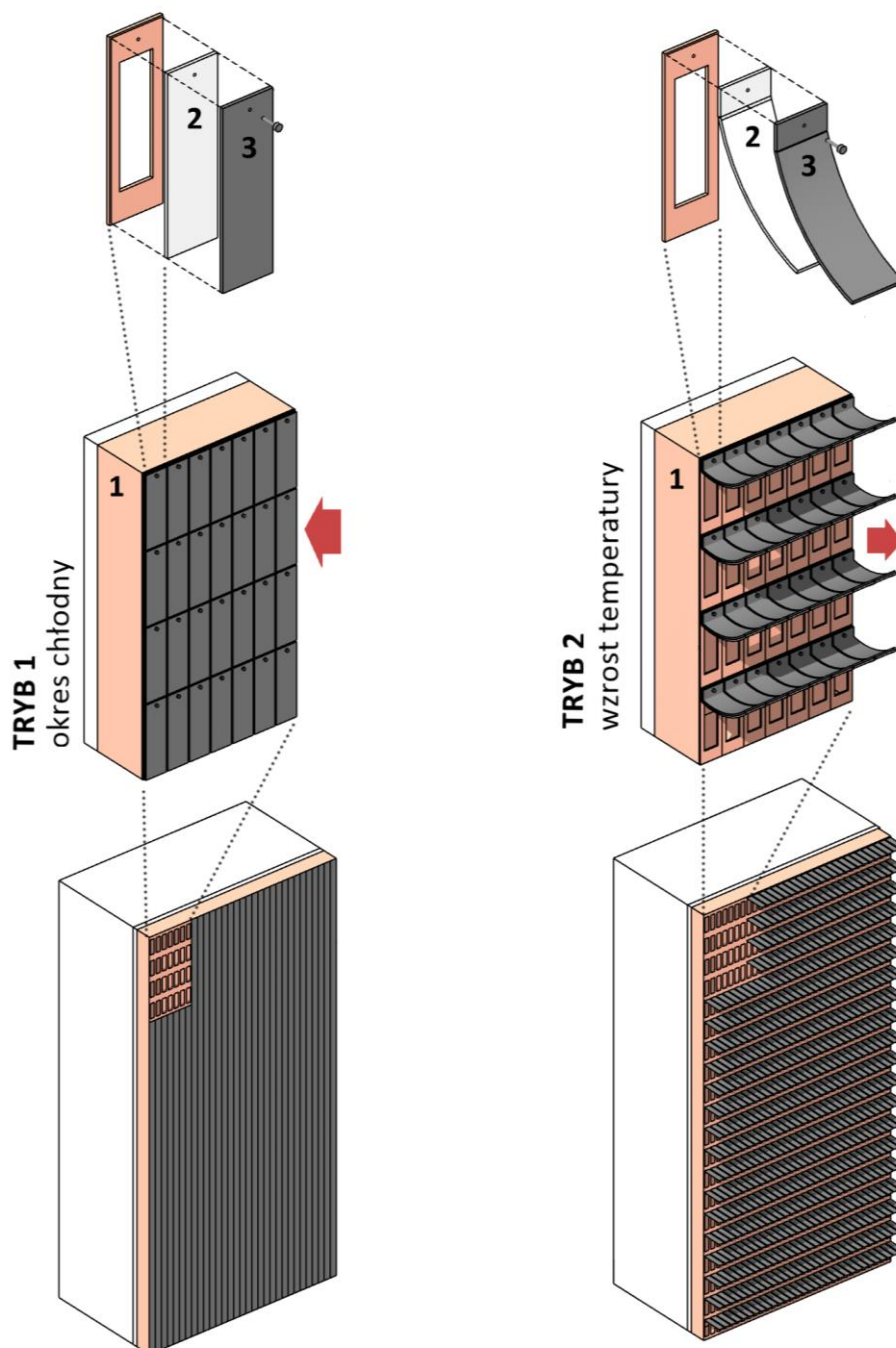
---

<sup>23</sup> Bardzo wysoka zdolność do akumulowania ciepła osiągnięta jest dzięki połączeniu tradycyjnego materiału o dużej masie akumulacyjnej z materiałem zmiennofazowym.

<sup>24</sup> Termobimetal powstaje w wyniku połączenia metodą lutowania lub zgrzewania dwóch stopów metali lub metali, o dwóch różnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej. Pod wpływem temperatury, ilości nasłonecznienia lub konwekcji metal o wyższym współczynniku, pełniący rolę warstwy czynnej, rozszerza się, oddziałując na warstwę bierną, czyli metal o niższym współczynniku (288), (289).

termobimetalu od komory zapobiega jednak dalszemu przekazywaniu ciepła na drodze przewodzenia. W projektowanym rozwiązaniu wznoszące prądy powietrzne, które tworzą się w strefie „odgiętych” termobimetalowych pasków, sprzyjają natomiast uwalnianiu ciepła do otoczenia w wyniku konwekcji.

### Ilustracja prezentująca koncepcję działania rozwiązania III



Rys. 6-13 Ilustracja pokazująca koncepcję działania rozwiązania III.  
Opracowanie własne.

## 6.2 FAZA IV | EWALUACJA

W *fazie IV*, będącej częścią procesu projektowania opartego na założeniach biomimikry, trzy uszczegółowione rozwiązania zostały poddane ocenie zgodnie z kryteriami tzw. „Zasad Życia” (*ang. Life Principles*), do których w *fazie I* autorka odnosiła się jako do aspiracyjnych celów projektowych. W paradygmacie projektowania opartego na biomimikrze ocena systemów technicznych (3 uszczegółowionych rozwiązań) odbywa się przy wykorzystaniu reguł panujących w przyrodzie, które pozwalają na zbalansowany, ciągły rozwój życia na Ziemi. Motywacją dla dokonania ewaluacji według wspomnianych reguł jest dążenie do stworzenia systemów technicznych (sztucznych), których działanie ma naśladować funkcjonowanie systemów naturalnych. Gwarantuje to optymalizowanie wpływu systemów technicznych na otaczające środowisko: eliminowanie negatywnego oddziaływania na ekosystem, a maksymalizowanie wzajemnych korzyści wynikających z ich powiązania oraz ze współpracy poszczególnych elementów tworzących rozwiązanie techniczne. „Zasady Życia” zostały dokładniej opisane w rozdziale 2.2.1.

Dla przeprowadzenia wyżej wspomnianej oceny Biomimicry Institute 3.8 (32) przygotował kryteria, tzw. „Zasady Życia”. Nowatorskim wkładem autorki jest zaadaptowanie tych kryteriów w formie tabel, służących do oceny rozwiązań technicznych. Tabele te są proste i zrozumiałe, co ułatwia ich stosowanie przez projektantów architektury. Na przykład wyeliminowano z nich terminologię z dziedziny nauk o życiu, zastępując ją terminologią z dziedziny nauk inżynierskich i technicznych. Spełnienie postulatów zawartych w poszczególnych zasadach, np. „tworzenie warunków sprzyjających rozwojowi życia” albo „integrowanie rozwoju ze wzrostem” jest ewaluowane w skali od 0 do 1: 0 – brak realizacji celu, 0,5 – częściowa jego realizacja, bądź 1 – wypełnienie kryterium. Każda przyznana ocena została uzasadniona. W efekcie autorka otrzymała mierzalne wyniki prezentowane w skali 0-100%. Rezultaty ocen pokazują w jakim stopniu dane rozwiązanie zostało zaadaptowane do funkcjonowania w środowisku gorącym i skrajnie suchym. Im wyższy wynik, tym bardziej pozytywne jest oddziaływanie danego rozwiązania na funkcjonowanie ekosystemu ziemskiego<sup>25</sup>.

W tabeli 6-2 przedstawiono porównanie osiągniętych przez poszczególne rozwiązania wyników. W załącznikach nr 1, 2, 3 zaprezentowano tabele ze szczegółowo przeprowadzoną ewaluacją.

### 6.2.1 KRÓTKIE CHARAKTERYSTYKI

#### 6.2.1.1 Rozwiązanie uszczegółowione I. Szczelne komory z pompowanymi membranami

**Typ systemu:** aktywny

**Krótką charakterystyka:** system składający się z pojedynczych pionowych, łączonych ze sobą modułów, które występują w dwóch wersjach – przezroczystej i nieprzezierniej. Ponadto projektowane moduły mają także kilka wariantów, które charakteryzuje odmienna szerokość i głębokość, dzięki czemu mogą być one montowane na poszczególnych ścianach w zależności intensywności promieniowania oraz kąta padania promieni słonecznych.

---

<sup>25</sup> W przyjętej metodologii oceny, które podlegają jednakowym kryteriom („Zasadom Życia”) w trakcie ewaluacji, mogą być formułowane na dwa sposoby. Pierwszy obejmuje ocenę tego samego rozwiązania przez większą grupę osób. W ten sposób obiektywny rezultat otrzymywany jest dzięki odmiennej perspektywie poszczególnych członków grupy. Drugi umożliwia dokonanie oceny jednej osobie, przy czym osoba ta ocenia kilka rozwiązań jednocześnie. Pozwala to na uniknięcie stronniczości oceny (*ang. bias*), a ponadto jednoznaczne wskazanie rozwiązania optymalnego.

### 6.2.1.2 Rozwiązanie uszczegółowione II. Fasada kinetyczna pokryta tkaniną techniczną

**Typ systemu:** aktywny

**Krótką charakterystyka:** fasada kinetyczna składająca się z pojedynczych, niezależnie sterowanych, pionowych modułów, zasilana energią słoneczną. Pojedynczy moduł składa się z układu sterowania oraz poruszanych przez niego elementów, na które naciągnięta jest tkanina techniczna. Kształt powłoki wykonanej z elastycznego materiału dostosowywany jest do intensywności promieniowania oraz kąta padania promieni słonecznych.

### 6.2.1.3 Rozwiązanie uszczegółowione III. Komory powietrzne pokryte paskami z termobimetalu

**Typ systemu:** pasywny

**Krótką charakterystyka:** system składający się z pojedynczych, prostokątnych, frezowanych komór powietrznych, które stanowią moduły montowane do elewacji. Do każdej komory przymocowane są paski z izolatora połączone z paskami z termobimetali, które reagują na zmiany temperatury otoczenia. Dzięki temu cały system pozwala regulować temperaturę przegrody, jak też chroni ją przed nadmiernym promieniowaniem słonecznym.

## 6.2.2 OGÓLNE PORÓWNANIE WYNIKÓW OSIĄGNIĘTYCH PRZEZ ROZWIĄZANIA

Tabela 6-2 prezentuje zestawienie wyników osiągniętych przez poszczególne rozwiązania. Poza ogólną oceną liczbową i procentową, pokazane są również wyniki dla poszczególnych kategorii – głównych „Zasad Życia”. Ocena ta wskazuje kluczowe punkty, które wymagają dalszych badań i opracowania, aby dane rozwiązanie było coraz bardziej przyjazne dla środowiska.

	R I.	R II.	R III.
<b>WYNIK OGÓLNY [%]</b>	<b>81,5</b>	<b>77,8</b>	<b>88,9</b>
<b>„Zasady Życia” (kategoria oceny)</b>	<b>WYNIKI [%]</b>		
1. Rozwiązanie tworzy warunki sprzyjające rozwojowi życia – jest dopasowane do naturalnych ograniczeń i możliwości	83,3	83,3	100,0
2. Rozwiązanie ulega ewolucji w długim okresie czasu – utrzymuje ciągłą wymianę i obieg informacji, zapewniające mu prawidłowe i trwałe działanie	90,0	80,0	100,0
3. Rozwiązanie integruje rozwój ze wzrostem – podlega optymalnym inwestycjom w strategię, które promują zarówno jego wzrost, jak też rozwój	91,7	91,7	100,0
4. Rozwiązanie jest adaptowalne do zmiennych warunków – właściwie reaguje na ciągle zachodzące dynamiczne zmiany	93,8	81,3	93,8
5. Rozwiązanie jest dostosowane do lokalnych warunków – jest wpasowane i zintegrowane z systemem	82,1	78,6	85,7
6. Rozwiązanie jest oparte na nieszkodliwej dla życia chemii – wykorzystuje materiały przyjazne środowisku naturalnemu	50,0	50,0	58,3
7. Oszczędnie i wydajnie wykorzystuje materiały i energię – podlega umiejętnemu i konsekwentnemu zarządzaniu dostępnymi zasobami oraz możliwościami	79,2	79,2	91,7

**Tab. 6-2** Prezentacja wyników osiągniętych przez poszczególne rozwiązania po ewaluacji wobec „Zasad Życia”. Opracowanie własne.

### 6.2.3 PODSUMOWANIE WYNIKÓW

W trakcie ewaluacji poszczególne rozwiązania osiągnęły odpowiednio wyniki: **Rozwiązanie I** – Szczelne komory z pompowanymi membranami – 81,5%, **Rozwiązanie II** – Fasada kinetyczna pokryta tkaniną techniczną – 77,8%, **Rozwiązanie III** – Komory powietrzne pokryte paskami z termobimetalu – 88,9%. Osiągnięte rezultaty wyraźnie wskazują na to, że w momencie pisania pracy doktorskiej najbardziej zaadaptowanym do środowiska pustynnego jest **Rozwiązanie III**. Wynik ten nie jest zaskakujący, gdyż samo rozwiązanie oparte jest na naturalnych zjawiskach oraz inteligentnych materiałach (termobimetal), które samoczynnie, bez potrzeby stosowania dodatkowych elementów, np. czujników oraz dostarczania energii z zewnątrz, reagują na zmiany zachodzące w otoczeniu. Rozwiązanie to jako jedyne w trzech kategoriach uzyskało maksymalny wynik. Pomimo wysokiej oceny ogólnej, wciąż posiada ono jednak obszary, które wymagają poprawy. Najniższy wynik uzyskało **Rozwiązanie II**, co również nie jest zaskakujące. Aktualnie idea proponowanej modułowej fasady kinetycznej oparta jest na systemach mechanicznych, wykorzystujących siłowniki, które w porównaniu do **Rozwiązania III**, czy też konwencjonalnych fasad wykonywanych w technologii mokrej, wymagają znacznego nakładu energii elektrycznej. **Rozwiązanie II** wymaga zatem ponownego przemyślenia sposobu jego działania oraz poszukiwania możliwości zastąpienia systemów mechanicznych, technikami pasywnymi, bądź inteligentnymi materiałami.

W przypadku wszystkich rozwiązań szczegółowa ewaluacja, z którą zapoznać się można w tabelach załączonych do niniejszej pracy (patrz: Zał. 1, Zał. 2, Zał. 3), pokazała interesujące wyniki. Gdyby ocena wobec „Zasad Życia” nie została przeprowadzona, prawdopodobnie pewne kwestie w ogóle nie zostałyby wzięte pod uwagę jako czynniki mogące negatywnie wpływać na integrację danego rozwiązania ze środowiskiem naturalnym.

Kategorią, w której każde rozwiązanie uzyskało najniższy wynik, jest wykorzystywanie nieszkodliwej dla życia chemii. Pomimo tego, że wykorzystywane w rozwiązaniach materiały podlegają recyklingowi lub nadają się do ponownego wykorzystania, to przy uwzględnieniu ich całkowitego cyklu życiowego – procesy produkcyjne oraz procesy związane z ich przetwarzaniem wywierają negatywny wpływ na środowisko, choćby przez wysokoenergetyczne reakcje, czy też emisję szkodliwych substancji. Ponadto procesy te wymagają dużego nakładu energii mechanicznej i elektrycznej.

Innym kryterium, którego nie spełniło żadne rozwiązanie jest stosowanie lokalnych, powszechnie dostępnych materiałów. Proponowane przez autorkę materiały nie są produkowane w dużych ilościach w regionach, które charakteryzuje klimat gorący i skrajnie suchy. Z tego względu wymagany jest ich import, a tym samym transport drogą kołową lub morską, często na znaczne odległości, co wyraźnie negatywnie wpływa na cykl życiowy rozwiązań.

Interesująca wydaje się być jednak odmienna perspektywa, w której ze względu na postępującą zmianę klimatu, niektóre z rozwiązań, opracowane w prezentowanej pracy dla klimatu gorącego i skrajnie suchego, mogą być wkrótce konieczne do zastosowania również w strefach, które obecnie charakteryzuje klimat umiarkowany. Z uwagi na to, że w regionach o klimacie umiarkowanym dostępność materiałów jest zdecydowanie większa, ocena rozwiązania mogłaby być inna.

Jeszcze jednym aspektem, który należałoby rozważyć, jest stosowanie różnorodnych modułów. Pod tym względem jedynie **Rozwiązanie I** przewiduje tworzenie modułów matowych, jak też transparentnych, które pozwoliłyby na tworzenie kompletnych powłok budynków.

Ważną kwestią przy dalszym opracowywaniu rozwiązań jest branie pod uwagę kosztów ich produkcji, użytkowania oraz demontażu i ewentualnej utylizacji. Pod tym względem wydaje się, że wszystkie proponowane rozwiązania kosztami produkcji przekraczają konwencjonalne systemy fasad mokrych, jedynie w przypadku **Rozwiązania III** może okazać się, że koszty jego utrzymania są podobne.

W celu ulepszenia rozwiązań uszczegółowionych konieczne jest dalsze konsultowanie się ze specjalistami różnych dziedzin (m.in. konstrukcji, elektroniki, materiałoznawstwa, mechaniki płynów, nanotechnologii). Rozwijanie tych pomysłów wymagać może również integracji kolejnych naturalnych mechanizmów, które nie zostały wcześniej opracowane przez autorkę. Konieczne tym samym jest ponowne powracanie do *fazy II* odkrywania i *fazy III* tworzenia. W celu walidacji poszczególnych wyników niezbędne jest natomiast przeprowadzanie symulacji komputerowych m.in. ciepłno-przepływowych analiz numerycznych oraz tworzenie prototypów rozwiązań.







# 7

## Podsumowanie

## 7 PODSUMOWANIE

---

W niniejszym rozdziale podsumowano przeprowadzone w trakcie przygotowywania pracy doktorskiej badania oraz zsyntetyzowano ich wyniki. W pierwszej części rozdziału zweryfikowano postawione na początku pracy pytania badawcze oraz stopień realizacji zadań badawczych. Następnie opisano wkład pracy w rozwój nauki. W podsumowaniu omówiono także ograniczenia oraz wyzwania, jakie zidentyfikowała autorka. W ostatniej części rozdziału autorka na podstawie osiągniętych wyników wskazuje dalsze możliwości prowadzenia badań.

### 7.1 WERYFIKACJA | POWRÓT DO PYTAŃ BADAWCZYCH

Rozważanym w niniejszej pracy głównym pytaniem badawczym było:

***W jaki sposób tworzyć rozwiązania możliwe do zastosowania w architekturze pozwalające na regulowanie komfortu termicznego wewnątrz budynku, oparte na strategiach adaptacyjnych zaczerpniętych z natury?***

Kontekstem do prowadzenia badań był klimat gorący i skrajnie suchy, który przebadano pod względem ograniczeń i możliwości. Z uwagi na to, że praca porusza również zagadnienie komfortu termicznego użytkowników, autorka dokonała przeglądu architektury rodzimej regionów pustynnych ze świadomością, że architektura ta przez wieki zapewniała swoim użytkownikom dogodne warunki bytowe. W odpowiedzi na powyższe pytanie, autorka opracowała rozwiązania inspirowane naturą, które zostały zaprojektowane zgodnie z założeniami biomimikry.

Aby odpowiedzieć na główne pytanie badawcze, autorka zweryfikowała kilka pytań składowych, do których odnosiła się w poszczególnych rozdziałach. Poniżej zaprezentowano podsumowanie tych odpowiedzi:

***Pytanie 1.: Jakie czynniki przyczyniają się do zaburzenia optymalnego komfortu termicznego w klimacie gorącym i skrajnie suchym?***

Niezależnie od wybranej metody pierwszy krok procesu projektowego powinno zawsze stanowić definiowanie kontekstu dla projektu. Poznanie go sprawia, że projekt jest bardziej dostosowany do lokalnych możliwości i ograniczeń. W niniejszej pracy kontekst ten tworzy omawiane przez autorkę środowisko pustynne wraz z jego wszystkimi uwarunkowaniami. Wśród kształtujących klimat gorący i skrajnie suchy czynników wyróżnić można te, które mają bezpośredni wpływ na zaburzenie optymalnego komfortu termicznego wewnątrz budynków (patrz: Rozdz. 3.4.1):

- (i) wysokie amplitudy temperatur roczne i dobowe (przy gruncie nawet ponad 85°C),
- (ii) wysokie temperatury maksymalne, niekiedy sięgające nawet 60°C,
- (iii) niska względna wilgotność powietrza, utrzymująca się na poziomie poniżej 30%,
- (iv) brak opadów (25-200 mm/rok),
- (v) brak zachmurzenia przez ponad 70% czasu, a w związku z tym duża insolacja.

***Pytanie 2.: Które rozwiązania stosowane w architekturze tradycyjnej pozwoliły na dostosowanie budynków do funkcjonowania w badanym klimacie? Czy możliwa jest ich adaptacja do obecnych wymogów współczesnego społeczeństwa?***

Historyczne, lokalne układy urbanistyczne wraz z rozwiązaniami stosowanymi w tradycyjnej architekturze regionów pustynnych przez wieki przyczyniały się do tworzenia komfortowych schronień<sup>26</sup> przed trudnymi warunkami środowiska zewnętrznego. Gęsta, zwarta zabudowa, wysokie kaniony uliczne, właściwe lokalizowanie i orientowanie budynków, to wszystko wpływało na lokalny mikroklimat bez potrzeby mechanicznego chłodzenia i ogrzewania budynków. Charakterystyczne dla tych regionów były budynki o grubych ścianach z wewnętrznymi atriami i niewielkimi otworami okiennymi. W architekturze wprowadzano także wiele elementów zacieniających. Często stosowano też tzw. „łapacze wiatru”, umożliwiające pasywną wentylację budynków lub przegrody wentylowane. Istotny był także odpowiedni dobór materiałów budowlanych, o wysokiej masie akumulacyjnej, oraz wykończeniowych – jasnych o dużym albedo.

Duża część wspomnianych rozwiązań została współcześnie porzucona, głównie ze względu na dominację ruchu kołowego oraz wpływ zachodnich trendów – np. fasady całoszklane – które widoczne są w układach urbanistycznych, jak też architekturze budynków. Pomimo wielu zmian, jakie zaszły w ostatnich dekadach, autorka niniejszej pracy jest przekonana o tym, że zasady działania dawnych systemów można adaptować do obecnie wznoszonych budynków. Jedną z opcji może być wdrażanie rozwiązań pasywnych, np. systemów wentylacyjnych. (patrz: Rozdz. 4.3).

***Pytanie 3.: Jakie są główne wyzwania projektowe związane z kształtowaniem komfortu termicznego wewnątrz budynków, którym muszą sprostać architekci projektujący w regionach gorących, skrajnie suchych?***

Problem kształtowania komfortu termicznego, stanu równowagi cieplnej organizmu, wewnątrz budynków jest dość złożonym zagadnieniem, na który wpływ mają czynniki fizjologiczne, psychologiczne i abiotyczne. Wśród ostatnich wymienia się (i) temperaturę powietrza/średnią temperaturę promieniowania otoczenia, (ii) prędkość przepływu powietrza oraz (iii) jego względną wilgotność. Przed architektami stoją zatem wyzwania projektowe, którym muszą sprostać, aby ten komfort kształtować. Wyzwania te występują zarówno w skali miasta, jak i samego doboru materiałów (patrz: Rozdz. 4.4). W trakcie przeglądu literatury autorka zidentyfikowała najważniejsze z nich:

- (i) dostosowanie budynków do skrajnych temperatur w ciągu doby, jak też roku – ograniczania zysków ciepła za dnia, uwalnianie go nocą, stosowanie pasywnych metod chłodzenia i ogrzewania, dobieranie odpowiednich materiałów ze względu na rozszerzalność cieplną i zdolność do magazynowania ciepła (bezwładność cieplną);
- (ii) zapobieganie występowaniu efektu nocnej miejskiej wyspy ciepła;
- (iii) ochrona budynków przed działaniem zarówno bezpośredniego, jak i odbitego promieniowania słonecznego (uwzględnianie albedo powierzchni) – projektowanie gęstej i zwartej zabudowy, której elementy umożliwiają wzajemne zacienianie, sadzenie roślinności i drzew o rozłożystych koronach;
- (iv) wykorzystanie naturalnej cyrkulacji powietrza (grawitacyjnej i przewietrzania) – dobór lokalizacji i właściwe orientowanie budynków.

---

<sup>26</sup> Wymagania dotyczące komfortu termicznego są definiowane inaczej przez mieszkańców klimatów gorących w stosunku do mieszkańców strefy klimatu umiarkowanego ciepłego. Wydaje się, że są oni gotowi do akceptowania wyższych temperatur na zewnątrz, jak też wewnątrz budynków (178). Zagadnienie komfortu termicznego poruszane jest przez autorkę w rozdziale 4.2.

***Pytanie 4.: Które mechanizmy, struktury, czy procesy występujące w przyrodzie są odpowiednie do tworzenia rozwiązań pozwalających na poprawę komfortu termicznego wewnątrz budynków w badanej strefie?***

Autorka skupiła się na badaniu komfortu termicznego wewnątrz budynków w regionach pustynnych, stwierdzając, że osiągnięcie jego optymalnego poziomu stanowi tam poważne wyzwanie. Wnioski wyciągnięte z badań przeprowadzonych w części analitycznej pracy pozwoliły w fazie I procesu projektowania opartego na założeniach biomimikry ustalić, że największe wyzwania w klimacie gorącym, skrajnie suchym stanowią: (i) dostosowywanie budynków do wysokich rocznych i dobowych amplitud temperatur oraz (ii) ich ochrona przed bezpośrednim działaniem promieniowania słonecznego (patrz: Rozdz. 5.1). W oparciu o nie, autorka wskazała dwie funkcje, pierwotną i uzupełniającą, jakie mają spełniać poszukiwane w naturze mechanizmy adaptacyjne. Tym samym postawiono odpowiednie pytania: W jaki sposób natura: (i) reguluje temperaturę, (ii) chroni się przed promieniowaniem (patrz: Rozdz. 5.1.3). W odpowiedzi na nie autorka zidentyfikowała grupę 63 organizmów ze świata flory i fauny, które te funkcje spełniają. Większość z nich występuje w regionach pustynnych.

***Pytanie 5.: Jak w zrozumieli sposób przekazać architektom zasady działania mechanizmów, strategii, struktur, czy procesów występujących w naturze, aby mogli je później wykorzystać do tworzenia zrównoważonych rozwiązań w architekturze?***

Inspirowanie rozwiązań, mających naśladować zasady działania, a nie dosłownie imitować naturalne mechanizmy i struktury, to proces złożony. Po pierwsze, konieczne było dokładne zrozumienie zasad działania badanych mechanizmów adaptacyjnych (analiza fizjologii i morfologii organizmu). W tym celu autorka przeprowadziła obszerną kwerendę artykułów naukowych i rozmowy ze specjalistami. Należy pamiętać, że te informacje są w następnej kolejności przekazywane konkretnej grupie odbiorców, którą w przypadku niniejszej pracy stanowią architekci. Jednym z najlepszych narzędzi w komunikacji z tą grupą odbiorców jest rysunek i diagram, które powinny być sporządzane samodzielnie, gdyż sama próba zwizualizowania zasady działania danej strategii pozwala ją lepiej poznać. Autorka wykonała odręczne szkice i rysunki, które w procesie opracowania rozwiązań stanowiły niezbędne narzędzie ich tworzenia, przykłady tych szkiców zawarte są w rozdziale 5.2.4. Na etapie tworzenia abstrakcyjnych treści i obrazów, przedstawiających w sposób dostępny dla architektów zdobytą wiedzę, autorka zastąpiła wszystkie terminy biologiczne (i nie tylko) określeniami technicznymi zrozumiałymi dla wybranej grupy odbiorców (patrz: Rozdz. 5.2.4).

***Pytanie 6.: W jaki sposób oceniać rozwiązania inspirowane naturą?***

Zgodnie z założeniami metody projektowania opartego na zasadach biomimikry wszystkie jej fazy odnoszone są do „Zasad Życia” (*ang. Life Principles*), odzwierciedlających reguły panujące w przyrodzie, dzięki którym możliwy jest ciągły, zbalansowany rozwój życia na Ziemi (patrz: Rozdz. 2). W fazie ewaluacji Zasady te są wykorzystywane jako narzędzie do określania miary osiągniętego celu. Projektowane przez autorkę uszczegółowione rozwiązania projektowe podlegają ocenie względem tych zasad, aby zweryfikować w jakim stopniu integrują się one z ekosystemem. Przypadki, w których kryteria nie są spełnione (ewaluacja na ocenę 0), wskazują obszar, w którym dane rozwiązania wciąż wymagają dalszej optymalizacji, tym samym umożliwiając dalszy ich rozwój. Po zakończeniu fazy IV (ewaluacji), projektowane przez autorkę systemy fasadowe osiągnęły odpowiednio wyniki: rozwiązanie I – 81,5%, rozwiązanie II – 77,8%,

rozwiązanie III – 88,9%. Świadczy to o tym, że określone obszary nadal wymagają dalszej interwencji, ponieważ dopiero spełnienie wszystkich celów świadczy o użyteczności, trwałości i nieszkodliwości danego rozwiązania w całym cyklu życiowym. (patrz: Rozdz. 6.2).

## 7.2 WNIOSKI | STOPIEŃ REALIZACJI ZADAŃ BADAWCZYCH

Główny cel niniejszej pracy stanowiło:

***Stworzenie rozwiązań architektonicznych zaprojektowanych zgodnie z zasadami biomimikry, które mają potencjał na poprawę komfortu termicznego wewnątrz budynków w strefie gorącej, skrajnie suchej.***

Zgodnie z założeniami w realizacji tego celu miały pomóc cztery pomniejsze zadania (patrz: Rozdz. 1.4), które zostaną omówione w niniejszym podsumowaniu.

Pomimo że na świecie biomimikra jest coraz częściej wdrażaną do procesu projektowego metodologią, niekiedy również w architekturze, w Polsce zagadnienie to jest wciąż mało znane. W niniejszej rozprawie doktorskiej zaprezentowano założenia filozofii towarzyszącej biomimikrze, jak też omówiono główne narzędzia i podejścia projektowe, będące jej nieodłącznymi elementami (**zadanie 1** – patrz: Rozdz. 2). Ponadto w części badawczej pracy w trakcie procesu projektowego po kolei omawiano każdy krok cyklu, składającego się z czterech głównych faz. Przeprowadzona w pierwszej części pracy analiza środowiska naturalnego pozwoliła zbudować kontekst oraz zrozumieć lokalne uwarunkowania i czynniki, oddziaływujące na architekturę klimatu gorącego i skrajnie suchego (patrz: Rozdz. 3.3.3). Po dokonaniu przeglądu i syntezy podstawowych cech lokalnych, tradycyjnych założeń urbanistycznych i rozwiązań architektonicznych (**zadanie 2** – patrz: Rozdz. 4.3), zgromadzona wiedza pozwoliła z łatwością wskazać główne problemy i wyzwania stojące przed architektami, projektującymi w regionach pustynnych (**zadanie 3** – patrz: Rozdz. 4.4). Stworzona baza daje możliwość wykorzystania tej wiedzy przy tworzeniu rozwiązań inspirowanych naturą, wykraczających poza badany kontekst związany z intencją poprawy komfortu termicznego. W oparciu o nią możliwe jest m.in. konstruowanie nowych założeń urbanistycznych i architektonicznych dla środowiska pustynnego.

W trakcie pracy autorka potwierdziła, że wybrana metodologia projektowania zgodnego z założeniami biomimikry może być aplikowana w dziedzinie architektury. Stwierdzono, że przy właściwym naśladowaniu zasad działania mechanizmów naturalnych, wielokrotne powtarzanie cykli projektowych, na których oparta jest wspomniana metoda posiada duży potencjał do tworzenia zintegrowanych ze środowiskiem rozwiązań. Szczególnie wyraźne jest to w przypadku środowisk ekstremalnych, m.in. klimatu gorącego i skrajnie suchego, gdyż występujące tam organizmy musiały wykształcić mechanizmy adaptacyjne, pozwalające im przetrwać w skrajnych warunkach (**zadanie 4** – patrz: Rozdz. 5, Rozdz. 6). Co więcej, jak wykazano, stosowana metodologia pozwala na tworzenie wielu oryginalnych koncepcji o wysokim potencjale poprawy komfortu termicznego wewnątrz budynków w stosunkowo niedługim czasie. Przeprowadzone badania pokazały, jak bardzo istotne w projektowaniu jest myślenie w odniesieniu do konkretnego kontekstu, gdyż dopiero m.in. uwzględnienie lokalnych uwarunkowań (np. czynników zewnętrznych, dostępności materiałów i energii) i adaptacja do nich pozwalają na tworzenie prawdziwie zrównoważonych rozwiązań w całym ich cyklu życiowym. W trakcie badań stwierdzono, że właściwym sposobem na realizację zasad architektury zrównoważonej jest integrowanie zasad działania architektury tradycyjnej, powstałej w wyniku wielu lat prób i błędów

z obserwacją naturalnych mechanizmów, współczesną nauką i technologią. W pracy wykazano, że stosowanie metodologii opartej na założeniach biomimikry wymaga integrowania wiedzy z zakresu wielu dziedzin. Konieczne tym samym jest nawiązywanie współpracy i tworzenie zespołów interdyscyplinarnych, co wiąże się z umiejętną i właściwą wymianą oraz prezentacją informacji na różnych etapach procesu projektowego. W trakcie pracy zidentyfikowano wiele możliwości i ograniczeń, jakie niesie ze sobą stosowanie wybranej metodologii. Wśród możliwości wyróżnić można: uporządkowanie procesu projektowego w formie cyklu, składającego się z następujących po sobie faz i kroków, wymiana informacji z zakresu różnych dziedzin, ocena wobec „Zasad Życia”, dająca jasną informację o tym, które obszary wciąż wymagają poprawy. Do ograniczeń należą natomiast: wydłużenie procesu projektowego w wyniku wdrażania dodatkowych czynności, potrzeba konsultacji ze specjalistami różnych dziedzin, nietypowych dla architektury, możliwość błędnej interpretacji zasad działania mechanizmów naturalnych, a w związku z tym niewłaściwe ich naśladowanie, potrzeba zaznajomienia się z metodologią, poznania i zrozumienia jej założeń i narzędzi, a następnie intensywnego praktykowania.

### 7.3 GŁÓWNE WYNIKI BADAŃ | WKŁAD BADAWCZY

W trakcie pracy autorka uzyskała wyniki badań, które stanowią wkład badawczy do współczesnej nauki. Główne wyniki zostały zaprezentowane poniżej.

- (i) Autorka określiła w pracy najważniejsze wyzwania projektowe związane z kształtowaniem komfortu termicznego wewnątrz budynków (**Pytanie 3**) w strefie gorącej, skrajnie suchej (patrz: Rozdz. 4.4).
- (ii) Autorka sporządziła taksonomię organizmów, których behawioralne, morfologiczne lub fizjologiczne mechanizmy adaptacyjne pozwalają im na regulowanie temperatury lub ochronę przed promieniowaniem (**Pytanie 4.**). Klasyfikacja ta obejmuje 63 gatunki zwierząt i roślin wraz z opisami ich strategii, które zebrane zostały w dwóch tabelach (patrz: Tab. 5-3, Tab. 5-4).
- (iii) W oparciu o sporządzoną klasyfikację, autorka wybrała 13 organizmów, które przebadła szczegółowo. W efekcie przygotowanych zostało 13 unikalnych kart z ilustracjami (patrz: Rozdz. 5.2.4). Każda z kart zawiera dokładny opis oraz diagram mechanizmu adaptacyjnego organizmu (**Pytanie 4.**) oraz powstała w oparciu o niego abstrakcyjną zasadę projektową i jej ilustrację. Zasada ta wraz z ilustracją stanowią – w zamierzeniu autorki – zrozumiałe dla architektów źródło przekazywania zdobytej wiedzy, pozbawiony biologicznych określeń, który w tej formie może inspirować ich do tworzenia rozwiązań inspirowanych naturą (**Pytanie 5.**).
- (iv) Autorka stworzyła 8 koncepcji rozwiązań inspirowanych badanymi organizmami (patrz: Rozdz. 6.1.1), które mogą podlegać dalszemu rozwojowi (**Pytanie 5.**). Następnie, w oparciu o wybrane koncepcje, autorka opracowała 3 oryginalne rozwiązania uszczegółowione (patrz: Rozdz. 6.1.3), które następnie poddała ocenie w oparciu o „Zasady Życia”. Proces ten pozwolił na otrzymanie mierzalnych wyników (patrz: Rozdz. 6.2.2), świadczących o tym, w jakim stopniu dane rozwiązanie jest dostosowane do działania w klimacie gorącym i suchym (**Pytanie 6.**).
- (v) Autorka przygotowała również tabele do ewaluacji rozwiązań w oparciu o kryteria przygotowane przez Instytut Biomimikry 3.8. (patrz: Zał. 1, Zał. 2, Zał. 3), które zostały zaadaptowane i dostosowane do oceny rozwiązań tworzonych przez architektów (**Pytanie 6.**).



## 7.4 OGRANICZENIA I WYZWANIA

Każda praca naukowa niesie ze sobą możliwość pojawiania się uproszczeń, które mogą wpływać na wiarygodność wyników. Takich ograniczeń świadoma jest również autorka. Zostają one ujęte w podpunktach poniżej:

- (i) **(O)** Przetawiona klasyfikacja/taksonomia obejmuje 63 gatunki roślin i zwierząt (szczegółowo opracowano 13 z nich). Autorka dołożyła starań, by one możliwie szeroko reprezentowały wachlarz możliwych mechanizmów adaptacyjnych (strategii dostosowawczych), ale możliwe jest istnienie innych strategii, które nie zostały ujęte w klasyfikacji.
- (ii) **(O)** W wielu badanych mechanizmach wykorzystywane są nano- i mikrostruktury opracowywanie szczegółowych rozwiązań w oparciu o nie jest niemożliwe bez udziału interdyscyplinarnych zespołów badaczy oraz prowadzenia dogłębnych badań nad budową oraz działaniem tych struktur.
- (iii) **(W)** Opracowanie bardziej szczegółowego rozwiązania wymaga konsultacji ze specjalistami innych dziedzin, co wiąże się z umiejętnością prowadzenia dialogu i klarownego przekazywania informacji z pogranicza różnych dyscyplin.
- (iv) **(W)** Dalsza weryfikacja rozwiązań wymaga przeprowadzania badań symulacyjnych nad przepływem ciepła przez przegrody, które pozwoliłyby zweryfikować efektywność działania poszczególnych rozwiązań.
- (v) **(W)** W procesie rozwijania rozwiązania od etapu pomysłu do etapu wdrożenia należy być świadomym faktu, że przegroda ulega również wielu innym oddziaływaniom (np. zapylenie, wentylacja przegrody, oddziaływanie wody opadowej). Odpowiednie uwzględnienie tych czynników może sprawić, że konieczne będzie wielokrotne powracanie do fazy odkrywania i tworzenia, co wydłuży stworzenie danego projektu i podwyższa jego koszty.

## 7.5 REKOMENDACJE

W oparciu o zidentyfikowane ograniczenia i wyzwania autorka wskazała w jaki sposób przeprowadzone dotychczas badania mogą być w dalszym ciągu rozwijane. Możliwe jest:

- (i) rozszerzenie klasyfikacji organizmów żywych – również spoza klimatu pustynnego – w celu rozpoznania innych strategii, umożliwiających regulowanie temperatury lub ochronę przed promieniowaniem słonecznym;
- (ii) przeprowadzenie szczegółowych analiz większej liczby badanych organizmów, a tym samym stworzenie większej liczby kart naturalnych wzorców projektowych;
- (iii) szczegółowe rozwijanie pozostałych koncepcji rozwiązań, w tym prowadzenie badań nad nano- i mikrostrukturami;
- (iv) przeprowadzenie cieplno-przepływowych analiz numerycznych, by zbadać efektywność działania projektowanych rozwiązań;
- (v) dostosowywanie rozwiązań uszczegółowionych do innych czynników wpływających na ich działanie – tworzenie przegród wielozadaniowych;
- (vi) testowanie koncepcji poprzez przygotowywanie prototypów opracowywanych rozwiązań.

## 7.6 DALSZE MOŻLIWE KIERUNKI BADAŃ

Podstawową koncepcją przyjętą w pracy była analiza, a następnie rozwój rozwiązań przeznaczonych do funkcjonowania w strefie gorącej i skrajnie suchej. W efekcie tych prac została opracowana metodologia prac projektowych, która z powodzeniem może być wdrażana do procesu projektowania także w innych strefach klimatycznych (np. umiarkowanej) dla innych elementów budynku (np. dachów). Co więcej, analiza rozwiązań ze strefy gorącej i skrajnie suchej dostarcza wielu wskazówek, dotyczących projektowania budynków w strefie klimatów umiarkowanych ciepłych, który ociepla się, a objęte nim tereny pustynnieją. Potencjalnie pozwoli to na lepsze przystosowanie budynków i ich użytkowników do – jak się wydaje – nieuchronnej zmiany klimatu w Europie.

## 7.7 UWAGA KOŃCOWA

Ostateczna edycja przedstawionej pracy doktorskiej odbywała się w czerwcu 2023 roku, który według ekspertów programu Copernicus Climate Change Service (C3S) (281) był najgorętszym czerwcem na świecie, przewyższającym o około 0,5°C średnią temperaturę z lat 1991-2020. Jak podają naukowcy w miesiącu tym w regionach północno-zachodniej Europy odnotowano najwyższe do tej pory czerwcowe temperatury powietrza a rekordowa temperatura powierzchni wód zmierzona na obszarach północnego Atlantyku przyczyniła się do powstania zjawiska morskiej fali upałów w Irlandii i Wielkiej Brytanii. Miesięczny raport CS3 informuje też, że niektóre rejony Kanady, Stanów Zjednoczonych, Meksyku, Azji i wschodniej Australii były znacznie cieplejsze niż zwykle.

Niepokojące dane wskazują na to, że wzrost temperatury będzie szybszy, niż przewidywały to dotychczasowo publikowane modele. Fakt ten stawia niniejszą pracę w szczególnym świetle, ponieważ już wkrótce – być może – mieszkańcy strefy klimatycznej umiarkowanej będą zmuszeni do stosowania rozwiązań pierwotnie wdrażanych w klimacie gorącym, skrajnie suchym, po to, aby wewnątrz schronień, w których egzystują zapewnić warunki optymalne do życia. Tym samym bez wątplenia potrzebne są rozwiązania, które będą w stanie wpłynąć na poprawę odczuwanego przez ludzi komfortu termicznego wewnątrz budynków bez jednoczesnego dalszego degradowania ekosystemu. Projektowanie oparte na założeniach biomimikry wydaje się być zatem jedną z właściwych metod, aby te rozwiązania tworzyć.



# BIBLIOGRAFIA

---

## Pozycje w bibliografii wg kolejności cytowania:

1. Hoegh-Guldberg O. et al. *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. Geneva, Szwajcaria. 2018.
2. Jacobs S. Biomimetics: a simple foundation will lead to new insight about process. *J. of Design & Nature and Ecodynamics*. 2014. 9(2): 83-94.
3. Wilson EO. *Biophilia*. Harvard University Press. 1984.
4. Vincent JFV, Bogatyreva OA, Bogatyrev NR, Bowyer A, Pahl AK. Biomimetics – its practice and theory. *J. R. Soc. Interface*. 2006. 3: 471-482.
5. Bhushan B. Biomimetics: lessons from nature – an overview. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2009. 367: 1445-1486.
6. Ivanić KZ, Tadić Z, Omazić MA. Biomimicry – an overview. *The Holistic Approach to Environment*. 2015. 5: 19-36.
7. Kennedy E, Fecheyr-Lippens D, Hsiung BK, Niewiarowski PH, Kolodziej M. Biomimicry: A Path to Sustainable Innovation. *Design*. 2015. 31(3): 66-73.
8. Mathews F. Towards a Deeper Philosophy of Biomimicry. *Organization and Environment*. 2011. 24(4): 364-387.
9. Benyus JM. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Nowy York. HarperCollins publishers. 2002.
10. Brzezicki M. *Analiza możliwości wzorowania się na budowie morfologicznej i sposobach funkcjonowania organicznych tkanek osłonowych w budowie "inteligentnych" fasad*. Raport Serii SPR. Wrocław. Politechnika Wroclawska, Wydział Architektury. 2006. Nr raportu: I-1/S-717/06.
11. Agkathidis A. *Biomorphic Structures: Architecture Inspired by Nature*. Londyn. Laurence King Publishing. 2017.
12. Wahl DC. Bionics vs. biomimicry: From control of nature to sustainable participation in nature. *WIT Trans. Ecol. Environ*. 2006. 87: 289-298.
13. Montana-Hoyos C, Fiorentino C. Bio-Utilization, Bio-Inspiration, and Bio-Affiliation in Design for Sustainability: Biotechnology, Biomimicry, and Biophilic Design. *The International Journal of Designed Objects*. 2016. 10(3): 1-18.
14. Lenau TA, Metze AL, Hesselberg T. Paradigms for biologically inspired design. In Proc. SPIE 10593, *Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication VIII*. 2018. Denver. 1059302.
15. Bać A. *Architektura energoaktywna po 2021 Tom1. Zagadnienia architektoniczno-budowlane*. Wrocław. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. 2020.
16. Sedki A. *Improving indoor thermal comfort in residential buildings in hot-arid climates through the combination of natural ventilation and insulation retrofitting techniques – Case study : Existing social housing stocks in Greater Cairo*. Rozprawa doktorska. Ferrara. Università degli Studi di Ferrara. 2014.
17. Foruzanmehr A. *Thermal Comfort in Hot Dry Climates. Traditional Dwellings in Iran*. Nowy Jork. Routledge. 2018.
18. Schneider-Skalska G. Projektowanie zrównoważone – zbliżenie do realizacji. w: *Mieszkać w mieście : XI Międzynarodowa Konferencja Instytutu Projektowania Urbanistycznego*. 2007. Kraków. 257-264.
19. Zielonko-Jung K, Idem R. Architektura proekologiczna: edukacja po dyplomie. Studia podyplomowe na Wydziale Architektury Politechniki Gdańskiej. *Architektura & Biznes*. 2022. 11: 48-51.

20. Idem R. Projektowanie środowiskowe. w: Kurkowska A, Mikołajczyk I. *Człowiek a przestrzeń*. Koszalin. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. 2016. 235-248.
21. Stangel M. Urban environmental acupuncture for improving the sustainability of dense city areas - Polish experiences from the SALUTE4CE project. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2023. 1: 15-27.
22. Bradecki T, Hallova A, Stangel M. Concretization of sustainable urban design education in the project based learning approach—experiences from a Fulbright specialist project. *Sustainability*. 2022. 14(12): 1-16.
23. Kamionka LW. *Architektura zrównoważona i jej standardy na przykładzie wybranych metod oceny*. ed. Kozłowski T. Kielce. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej. 2012.
24. Celadyn W. Postgraduate studies and sustainable architecture. *Global Journal of Engineering Education*. 2018. 54-58.
25. Celadyn W, Witczek A. Zrównoważone rozwiązania w zakresie architektury. w: Firląg S. *Zrównoważone budynki biurowe : projektowanie, uwarunkowania prawne, rozwiązania technologiczne : praca zbiorowa we współpracy z PLGBC*. Warszawa. Wydaw. Naukowe PWN. 2018. 143-182.
26. Gruber P. *Biomimetics in architecture*. *Architecture of Life and Buildings*. Wiedeń. Springer. 2011.
27. Mead T, Jeanrenaud S. The elephant in the room: biomimetics and sustainability? *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*. 2017. 6(2): 113-121.
28. Giannetti BF, Almeida CMVB, Bonilla SH. Comparing emergy accounting with well-known sustainability metrics: The case of Southern Cone Common Market, Mercosur. *Energy Policy*. 2012. 38(7): 3518-3526.
29. Atlee J, Kirchain R. Operational Sustainability Metrics Assessing Metric Effectiveness in the Context of Electronics-Recycling Systems. *Environ. Sci. Technol*. 2006. 40(14): 4506–4513.
30. Badarnah-Kadri L. *Towards the Living envelope. Biomimetics for building envelope adaptation*. Rozprawa doktorska. Zutphen. Wöhrmann Print Service B.V. 2012.
31. Pawlyn M. *Biomimicry in Architecture*. Londyn. RIBA Publishing. 2016.
32. Baumeister D, Trocke R, Dwyer J, Ritter S, Benyus J. *Biomimicry Resource Handbook: a Seed Bank of Best Practices*. Missoula. Biomimicry 3.8. 2014.
33. McGregor SLT. Transdisciplinarity and Biomimicry. *Transdisciplinary Journal of Engineering & Science*. 2013. 4: 57-65.
34. Khelil S. *Biomimicry, towards a living architecture in hot and arid regions Biskra*. Praca magisterska. Mohamed Khider University. 2015.
35. Romanowska J, Brzezicki M. Budynek w ekstremalnych strefach klimatycznych. *Builder*. 2019 kwiecień 26: 42-46.
36. Bardzińska-Bonenberg T, Bonenberg A. Nurt wernakularny we współczesnych realizacjach polskich architektów. *Czasopismo techniczne*. 2010. 7-13.
37. Zuaier L. *Vernacular Passive Cooling Strategies in Hot- Dry Regions of Middle East and North Africa. Sustainable Residential Buildings in U.A.E*. Rozprawa doktorska. Abu Dhabi: Abu Dhabi University. 2015.
38. Brzezicki M. *Zastosowanie zaawansowanych technologii w rozwiązaniach proekologicznych w architekturze*. Rozprawa doktorska. Wrocław. Politechnika Wroclawska. 2001.
39. Khan HM, Al-Saadi S, Benkari N, Al-Hashim A. Numerical Simulation of Ventilation Potential in Traditional Omani House: Bait al Khandaq an an Example. *The Journal of Engineering Research*. 2021. 91-100.
40. Azzhary KE, Ouakarrouch M, Laaroussi N, Garoum M. Energy efficiency of a vernacular building design and materials in hot arid climate: Experimental and numerical approach. *International Journal of Renewable Energy Development*. 2021. 481-494.

41. Sherwood SC, Huber M. An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010. 107(21): 9552-9555.
42. Laity JJ. *Deserts and Desert Environments*. Chichester. Wiley-Blackwell. 2008.
43. Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2007. 11(5): 1633-1644.
44. Carrobe A, Rincón L, Martorell I. Thermal Monitoring and Simulation of Earthen Buildings. *A Review. Energies*. 2021. 14: 2080.
45. Arbabzadeh M, Etesam I, Mofidi SM. Biomimetic and vernacular building design in connection with environment. *EurAsian Journal of BioSciences*. 2017. 11: 52-59.
46. World Commission on Environment and Development. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. Oxford. 1987.
47. Lechner N. *Heating, Cooling, Lighting: sustainable design methods for architects., edycja 3*. New Jersey. John Wiley & Sons Inc. 2009.
48. Bać A. *Architektura energoaktywna po 2021. Tom 2. Zagadnienia instalacyjno-projektowe*. Wrocław. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. 2020.
49. Benzarti Ghedas H. *Modeling and thermal optimization of residential buildings using BIM and based on RTS method: Application to traditional and standard house in Sousse city*. Rozprawa doktorska. Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. 2017.
50. Arbabzadeh M, Etesam I, Mofidi SM. Passive Thermoregulation in Vernacular and Biomimetic Architecture in Hot and Arid Climate. *Int. J. Architect. Eng. Urban Plan*. 2020. 30(2): 198-211.
51. Sandak A, Sandak J, Brzezicki M, Kutnar A. *Bio-based building skin*. Singapur. Springer. 2019.
52. Lebidiew S. *Architektura i bionika*. Warszawa. Arkady. 1983.
53. Stevens LL. *Analogical reasoning in biomimicry design education*. Rozprawa doktorska. Delft: Delft University of Technology. 2021.
54. Khelil S, Khelil AE, Korkmaz K, Zemmouri N. Raising the efficiency of deployable building facades with Biomimetics for hot. w: *Proceedings of the ATI 2020: "Smart Buildings, Smart Cities"*. 2020. Izmir, Turcja.
55. Betül AY, Semra AS, Güneş MA. Biomimetic Thermoregulation in Building Shells. *Tasarım Kuram*. 2022. 18(37): 96-110.
56. de Dear R, Xiong J, Kim J, Cao B. A review of adaptive thermal comfort research since 1998. *Energy and Buildings*. 2020. 214.
57. Cruz E, Blanco E, Aujard F, Raskin K. Has Biomimicry in Architecture Arrived in France? Diversity of Challenges and Opportunities for a Paradigm Shift. *Biomimetics*. 2022. 7(4): 212.
58. Lopez M, Rubio R, Martin S, Croxford B. How plants inspire facades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2017. 67: 692-703.
59. Blanco E, Cruz E, Lequette C, Raskin K, Clergeau P. Biomimicry in French Urban Projects: Trends and Perspectives from the Practice. *Biomimetics*. 2021. 6(2): 27.
60. Varshabi N, Selcuk SA, Avinc GM. Biomimicry for Energy-Efficient Building Design: A Bibliometric Analysis. *Biomimetics*. 2022. 7(1): 21.
61. Al-Obaidi KM, Ismail MA, Hussein H, Rahman AMA. Biomimetic building skins: An adaptive approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. 79: 1472-1491.
62. Xing YG, Jones P, Bosch M, Donnison I, Spear M, Ormondroyd G. Exploring design principles of biological and living building envelopes: what can we learn from plant cell walls? *Intelligent Buildings International*. 2018. 10(2): 78-102.

63. Hosseini SM, Mohammadi M, Rosemann A, Schröder, Lichtenberg J. A morphological approach for kinetic facade design process to improve visual and thermal comfort: Review. *Building and Environment*. 2019. 153: 186-204.
64. Faragalla AMA, Somayeh A. Biomimetic Design for Adaptive Building Façades: A Paradigm Shift towards Environmentally Conscious Architecture. *Energies*. 2022. 15: 5390.
65. Hertzsch E. Sustainable buildings: biomimicry and textile applications. w: *Pohl G. Textiles, Polymers and Composites for Buildings*. Woodhead Publishing. 2010. 375-397.
66. Sheikh WT, Asghar Q. Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings. *Frontiers of Architectural Research*. 2019. 8(3): 319-331.
67. Nalcaci G, Nalcaci G. Modeling and Implementation of an Adaptive Facade Design for Energy Efficiently Buildings Based Biomimicry. w: *8th International Conference on Smart Grid (ICSMARTGRID2020)*. 2020. Paryż. 140-145.
68. Hosseini SM, Mohammadi M, Schroeder T, Guerran-Santin O. Bio-inspired interactive kinetic façade: Using dynamic transitory-sensitive area to improve multiple occupants' visual comfort. *Frontiers of Architectural Research*. 2021. 10(2): 821-837.
69. Anzaniyan E, Alaghmandan M, Koohsari AM. Design, fabrication and computational simulation of a bio-kinetic facade inspired by the mechanism of the *Lupinus Succulentus* plant for daylight and energy efficiency. *Science and Technology for the Built Environment*. 2022. 28(10): 1456-1471.
70. Sankaewthong S, Horanont T, Miyata K, Karnjana J, Busayarat C, Xie H. Using a Biomimicry Approach in the Design of a Kinetic Façade to Regulate the Amount of Daylight Entering a Working Space. *Buildings*. 2022. 12(2089): 1-26.
71. Hanafin S, Datta S, Rolfe B. TREE FACADES Generative Modelling with an Axial Branch Rewriting System. w: *Proceedings of the 16th International Conference on Computer-aided Architectural Design Research in Asia (Caardia 2011): Circuit Bending, Breaking and Mending*. 2011. New Castle. 175-184.
72. El Ahmar S, Fioravanti A. Biomimetic-Computational Design for Double Facades in Hot Climates A Porous Folded Facade for Office Buildings. w: *ECAADE 2015: Real Time – Extending the Reach of Computation*. 2015. Wiedeń. 687-696.
73. Hershovich , van Hout R, Rinsky V, Laufer M, Grobman YJ. Thermal performance of sculptured tiles for building envelopes. *Building and Environment*. 2021. 197: 107809.
74. Peeks M, Badarnah L. Textured Building Façades: Utilizing Morphological Adaptations Found in Nature for Evaporative Cooling. *Biomimetics*. 2021. 6(2): 24.
75. Webb M, Aye L, Green R. Simulation of a biomimetic facade using TRNSYS. *Applied Energy*. 2018. 213: 670-694.
76. Bouabdallah N, M'sellem H, Alkama D. Biomimicry as an Approach for Sustainable Architecture Case of Arid Regions with Hot and Dry Climate. *AIP Conference Proceedings*. 2016. 1758(1): 020003.
77. Widera B. Biomimetic and bioclimatic approach to contemporary architectural design on the example of CSET building. w: *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016 : nano, bio and green-technologies for a sustainable future*. 2016. Sofia. 485-492.
78. Widera B. Biomimetics in architecture. w: Brotas L, Roaf S, Nicol F. *PLEA 2017 Edinburgh: Design to Thrive*. 2017. Edynburg. 312-319.
79. Widera B. Nature-based solutions for climate resilient buildings and cities. w: *NORDSCI: Nordsci Conference on Social Sciences*. 2018. Helsinki. 63-70.
80. Widera B. *Proces kształtowania relacji z naturą w architekturze współczesnej*. Wrocław. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. 2018.
81. Brzezicki M. Wzorce organiczne w projektowaniu fasad eksperymentalnych. w: Nyka L. *Architektura współczesna wobec natury*. Gdańsk. Politechnika Gdańska. 2002. 86-94.

82. Onyszkiewicz JW. *Elementy biomimetyki w projektowaniu architektury w środowisku zrównoważonym. Ewolucja i interpretacja bioniki na przykładzie polskich i zagranicznych konkursów architektonicznych*. Rozprawa doktorska. Wrocław. Politechnika Wroclawska. 2019.
83. Samek A. *Bionika. Wiedza przyrodnicza dla inżynierów*. Kraków. Wydawnictwo AGH. 2010.
84. Samek A. *Bionika w kształceniu*. Kraków. Wydawnictwa AGH. 2013.
85. Badarnah L, Kadri U, Knaack U. A bio-inspired ventilating envelope optimized by air-flow simulations. w: Floiente G, Paevere P. *2008 World Sustainable Building Conf. SB08*. 2008. 230-237.
86. Badarnah L. A Biophysical Framework of Heat Regulation Strategies for the Design of Biomimetic Building Envelopes. *Procedia Engineering*. 2015. 118: 1225-1235.
87. Sommese F, Badarnah L, Ausiello G. A critical review of biomimetic building envelopes: towards a bio-adaptive model from nature to architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. 169: 112850.
88. Badarnah L, Nachman Farchi Y, Knaack U. Solutions from nature for building envelope thermoregulation. w: *Design & Nature Conf.: Comparing Design and Nature with Science and Engineering*. 2010. Southampton. WIT Press.
89. Grabowski E. *Urbanistyczne problemy amerykańskich miast na pustyni na przykładzie Phoenix w Arizonie i Las Vegas w Newadzie*. Rozprawa doktorska. Kraków. Politechnika Krakowska. 2014.
90. Gado T, Osman M. Investigating Natural Ventilation Inside Walk-Up Housing Blocks in the Egyptian Desert Climatic Design Region. *International Journal of Ventilation*. 2009. 145-160.
91. Sheta WSS. Delivering Quality Indoor Environment in Houses – The Potentials and Impact of Building Materials for Facade Design in Cairo. w: *PLEA 2011 - 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. 2011. Louvain-la-Neuve. 517-522.
92. Sedki A, Hamza N, Zaffagnini T. Effect of Orientation on Indoor Thermal Neutrality in Winter Season in Hot Arid Climates Case Study: Residential Building in Greater Cairo. *IACSIT*. 2013. 712-716.
93. Dabaieh M, Wanas O, Amer Hegazy M, Johansson E. Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings. *Energy and Buildings*. 2015. 142-152.
94. Beckett CTS, Cardell-Oliver R, Ciancio D, Huebner C. Measured and simulated thermal behaviour in rammed earth houses in a hot-arid climate. Part B: Comfort. *Journal of Building Engineering*. 2017. 146-158.
95. Wahl E. *Buildings in Arid Desert Climate: Improving Energy Efficiency with Measures on the Building Envelope*. Praca magisterska. Luleå. Luleå University of Technology. 2017.
96. Shehata AM, Waheeb SA. Thermal Performance of Contemporary Residential Buildings in Hot-Arid Climates. *Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems*. 2018. 1750-1758.
97. Vethanayagam V, Abu-Hijleh B. Increasing efficiency of atriums in hot, arid zones. *Frontiers of Architectural Research*. 2019. 284-302.
98. Al-Qahtani LAH, Elgizawi LSE. Building envelope and energy saving case study: A residential building in Al-Riyadh, Saudi Arabia. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2020. 555-564.
99. Bencheikh D, Bederina M. Assessing the duality of thermal performance and energy efficiency of residential buildings in hot arid climate of Laghout, Algeria. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2020. 143-162.
100. Reyes-Barajas KD, Romero-Moreno RA, Sotelo-Salas C, Luna-Leon A, Bojórquez-Morales G. Passive Strategies for Energy-Efficient Building Envelopes for Housing Developments in Hot Arid Climates. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2020. 115-125.
101. Soflaei F, Shokouhian M, Tabadkani A, Moslehi H, Beradi U. A simulation-based model for courtyard housing design based on adaptive thermal comfort. *Journal of Building Engineering*. 2020. 101335.



102. Amraoui K, Sriti L, Di Turi S, Ruggiero F, Kaihoul A. Exploring building's envelope thermal behavior of the neo-vernacular residential architecture in a hot and dry climate region of Algeria. *Build Simul.* 2021. 1567-1584.
103. Salih K, Ledesma G, Saeed ZO. Simulation of Energy Efficiency Measures for the Residential Building Stock: A case study in the Semi-Arid Region. w: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021. 1090 012018.
104. Taleb HM, Abumoeilak L. An assessment of different courtyard configurations in urban communities in the United Arab Emirates (UAE). *Smart and Sustainable Built Environment.* 2021. 67-89.
105. William MA, Suárez-López MJ, Soutullo S, Hanafy AA. Techno-economic evaluation of building envelope solutions in hot arid climate: A case study of educational building. *Energy Reports.* 2021. 550-558.
106. Lahmar I, Cannavale A, Martellotta F, Zemmouri N. The Impact of Building Orientation and Window-to-Wall Ratio on the Performance of Electrochromic Glazing in Hot Arid Climates: A Parametric Assessment. *Buildings.* 2022. 724.
107. Athmani W, Sriti L, Dabaieh M, Younsi Z. The Potential of Using Passive Cooling Roof Techniques to Improve Thermal Performance and Energy Efficiency of Residential Buildings in Hot Arid Regions. *Buildings.* 2023. 21.
108. Pedersen Zari M. *Ecosystem Services Analysis for the Design of Regenerative Urban Built Environments.* Rozprawa doktorska. Auckland: Auckland University of Technology. 2012.
109. Kellert SR. *Building for Life: Designing and Understanding the Human-Nature Connection.* Waszyngton DC. Island Press. 2005.
110. Taylor PW. The ethics of respect for nature. *Environmental ethics.* 1981. 3(3): 197-218.
111. Attfield R. Biocentrism, moral standing and moral significance. *Philosophica.* 1987. 39(1): 47-58.
112. Dí'az S, Demissew S, Carabias J, Joly C, Lonsdale M, Ash N, et al. The IPBES Conceptual Framework – connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability.* 2015. 14: 1-16.
113. biomimicry.org. [Online]. dostęp: 2022 styczeń 31. <https://toolbox.biomimicry.org/core-concepts/earths-operating-system/>.
114. Biomimicry Institute. Nature's unifying patterns: Ten lessons to consider every time you design something. [Online]. 2015. dostęp: 2022 luty 11. <https://toolbox.biomimicry.org/core-concepts/natures-unifying-patterns/>.
115. Hoagland MB. *The Way Life Works.* Nowy Jork. Times Books. 1995.
116. Stevens LL, Mulder KF, Kopnina HN, De Vries MJ. Nature knows better? Nature as exemplar and/or inspiration? w: *10th Conference on Engineering Education for Sustainable Development.* 2021. Cork.
117. Brodrick D. *Natural Genius: Approaches and Challenges to Applying Biomimetic Design Principles in Architecture.* Praca magisterska. Kolorado. University of Colorado Boulder. 2020.
118. Raḡsan Karabetça A. Nature Inspired Architectural Designs: Using Biomimicry as a Design Strategy. w: *International Conference on New Trends in Architecture and Interior Designing.* 2015. Istambul.
119. Solomon EP, Berg LR, Martin DW. *Biologia.* Warszawa. MULTICO Oficyna Wydawnicza. 2007.
120. Olson DM, Dinerstein E, Wikramanayake ED, Burges ND, Powell GVN, Underwood EC, et al. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience.* 2001. 51(11): 933-938.
121. Biomimicry Group , HOK Group. *Genius of Biome Report: temperate broadleaf forest.* 2011-2013.
122. Dimitrakopoulos PG, Troumbis AY. Biotopes. w: *Encyclopedia of Ecology (Second Edition) vol. 1.* Mytilene. Elsevier B.V. 2019. 359-365.
123. Malhi Y, Franklin J, Seddon N, Solan M, Turner MG, Field CB, et al. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 2020. 375: 1-8.
124. Seddon AWR, Macias-Fauria M, Long PR, Benz D, Willis KJ. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature.* 2016. 531: 229-232.
125. Gut P, Ackerknecht D. *Climate Responsive Building – Appropriate Building Construction in Tropical and Subtropical Regions.* St. Gallen. SKAT. 1993.

126. Arnfield JA. Climate classification. *Encyclopedia Britannica*. 2016 Mar. 17.
127. Burchard-Dziubińska M. Adaptacje terenów zurbanizowanych do zmian klimatu. w: Rzeńca A. *EkoMiasto#Środowisko. Zrównoważony, inteligentny i partycypacyjny rozwój miasta*. Łódź. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego. 2016. 143-163.
128. Kozłowska-Szczęsna T, Błażejczyk K, Krawczyk B. *Bioklimatologia człowieka*. Warszawa. PAN IGiPZ. 1997.
129. Joubert L. Kalahari. *National Geographic*. 2021. 8: 26-42.
130. Korb J. Thermoregulation and ventilation of termite mounds. *Naturwissenschaften*. 2003. 90: 212-219.
131. Foy S. *The grand design: Form and colour in animals*. Prentice-Hall. 1983.
132. Lillywhite HB, Stein BR. Surface sculpturing and water retention of elephant skin. *Journal of Zoology*. 1987. 211: 727-734.
133. Cloudsley-Thompson L. Multiple factors in the evolution of animal coloration. *Naturwissenschaften*. 1999. 86(3): 123-132.
134. Schmidt-Nielsen K, Schmidt-Nielsen B. Water metabolism of desert mammals. *Physiol. Rev.* 1952. 32(3): 135-166.
135. Taylor CR, Lyman CP. Heat storage in running antelopes: independence of brain and body temperatures. *Am J Physiol.* 1972. 222(1): 114-117.
136. Nørgaard T, Dacke M. Fog-basking behaviour and water collection efficiency in Namib Desert Darkling beetles. *Frontiers in Zoology*. 2010. 7(23).
137. Withers P. Cutaneous Water Acquisition by the Thorny Devil (*Moloch horridus*: Agamidae). *Journal of Herpetology*. 2006. 27(3): 265-270.
138. Zhao Y, Norouzi H, Azarderakhsh M, AghaKouchak A. Global Patterns of Hottest, Coldest, and Extreme Diurnal Variability on Earth. *BAMS*. 2021. 102(9): E1672-E1681.
139. Ali-Toudert F, Djenane M, Bensalem R, Mayer H. Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. *Climate Research*. 2005. 28: 243-256.
140. Dymowska T, Dymowski W, Mityk J, Mycielska-Dowgiałło E. Cechy teksturalne osadów wydmych pustyń Azji Południowo-Zachodniej. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*. 1984. 54(1/2): 241-260.
141. Moossavi SM. Passive Building Design for Hot-Arid Climate in Traditional Iranian Architecture. w: *Green Building Congress, International Conference and Exhibition on Green Buildings and Built Environment 12th Edition*. 2014. Hyderabad.
142. Salman M. Sustainability and Vernacular Architecture: Rethinking What Identity Is. w: *Urban and Architectural Heritage Conservation within Sustainability*. IntechOpen. 2018. 1-16.
143. Widera B. Bioclimatic architecture. *Journal of Civil Engineering and Architecture Research*. 2015. 2(4): 567-578.
144. Ferrante A. *Towards Nearly Zero Energy*. Oxford. Butterworth-Heinemann. 2016.
145. Hany N, Alaa H. Thermal comfort optimization through bioclimatic design in Mediterranean cities [version 2; peer review: 1 approved, 1 approved with reservations]. *F1000Research*. 2022. 10(1047): 1-26.
146. Hailu H, Gelan E, Girma Y. Indoor Thermal Comfort Analysis: A Case Study of Modern and Traditional Buildings in Hot-Arid Climatic Region of Ethiopia. *Urban Sci*. 2021. 5(3): 1-35.
147. Aghimien EI, Li DHW, Tsang EKW. Bioclimatic architecture and its energy-saving potentials: a review and future directions. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021. 29(2): 961-988.
148. Śliwowski L. *Mikroklimat wewnątrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach*. Wrocław. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. 1999.

149. Kubacka E, Heim D. Komfort termiczny w pomieszczeniu ze zdecentralizowanym, mechanicznym systemem doprowadzenia powietrza. *JCEEA*. 2015. 32(62): 239-248.
150. Chojnacka A, Sudoł-Szopińska I. Komfort termiczny w pomieszczeniach biurowych w aspekcie norm. *Bezpieczeństwo Pracy*. 2007. 6: 16-19.
151. Kordjamshidi M. *House Rating Schemes: From Energy to Comfort Base*. Berlin. Springer. 2011.
152. ANSI/ASHRAE. *Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta. 2010.
153. Sudoł-Szopińska I, Chojnacka A. Określanie warunków komfortu termicznego w pomieszczeniach za pomocą wskaźników PMV i PPD. *Bezpieczeństwo Pracy*. 2007. 5: 19-23.
154. Pieczara J. Naturalne przewietrzanie i komfort termiczny w budynkach użyteczności publicznej. *Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych*. 2016. (1): 29-39.
155. Lis A. Ocena komfortu cieplnego osób w budynkach mieszkalnych na podstawie wskaźników PMV i PPD. *Budownictwo*. 2016. 22: 213-222.
156. Fanger OP. *Komfort cieplny*. Warszawa. Arkady. 1974.
157. Nicol JF, Humphreys MA. Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings. *Energy and Buildings*. 2002. 34(6): 563-572.
158. Ahriy A, Mesloub A, Elkhayat K, Alghaseb MA, Abdelhafez MH, Ghosh A. Development of a Mosque Design for a Hot, Dry Climate Based on a Holistic Bioclimatic Vision. *Sustainability*. 2021. 13(11): 6254.
159. Javanroodi K, Mahdavinejad M, Nik VM. Impacts of urban morphology on reducing cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate. *Applied Energy*. 2018. 231: 714-746.
160. Khalili M, Amindeldar S. Traditional solutions in low energy buildings of hot-arid regions of Iran. *Sustainable Cities and Society*. 2014. (13): 171-181.
161. Varzaneh EH, Amini M, Bemanian MR. Impact of Hot and Arid Climate on Architecture (Case Study: Varzaneh Jame Mosque). *Procedia Engineering*. 2014. (94): 25-32.
162. Galal OM, Sailor DJ, Mahmoud H. The impact of urban form on outdoor thermal comfort in hot arid environments during daylight hours, case study: New Aswan. *Building and Environment*. 2020. 184: 1-15.
163. Middel A, Häb K, Brazel AJ, Martin CA, Guhathakurta S. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*. 2014. 122: 16-28.
164. Bahgat R, Reffat RM, Elkady SL. Analyzing the impact of design configurations of urban features on reducing solar radiation. *Journal of Building Engineering*. 2020. 32(101664): 1-19.
165. St Clair P. Low-energy design in the United Arab Emirates – Drivers and Urban Design Principles. *Environment Design Guide*. 2009. 29: 1-9.
166. Butera FM, Morello E, Pastore MC, Leonforte F. *Energy and resource efficient urban neighbourhood design principles for tropical countries - A Practitioner's Guidebook Nairobi*. Kenia. UN-HABITAT. 2018.
167. Ali-Toudert F, Mayer H. *Street design and thermal comfort in hot and dry climate*. Germany: Meteorological Institute. University of Freiburg. 1997.
168. Johansson E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: a study in Fez, Morocco. *Building and Environment*. 2006. 41(10): 1326-1338.
169. Bourbia F, Boucheriba F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy*. 2010. 35(2): 343-347.
170. Yahia MW, Johansson E. Microclimate and Thermal Comfort of Urban Spaces in Hot Dry Damascus - Influence of urban design and planning regulations. *Journal of Housing and the Built Environment*. 2013. 28(1): 51-65.
171. Hamdan DMA, de Oliveira FL. The impact of urban design elements on microclimate in hot arid climatic conditions: Al Ain City, UAE. *Energy and Buildings*. 2019. 200: 86-103.

172. Mohamed M, Othman A, Abotalib AZ, Majrashi A. Urban Heat Island Effects on Megacities in Desert Environments Using Spatial Network Analysis and Remote Sensing Data: A Case Study from Western Saudi Arabia. *Remote Sensing*. 2021. 13: 1941.
173. Flemming G. *Klimat-środowisko-człowiek*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. 1983.
174. Mohamed MAA. Traditional Ways of Dealing with Climate in Egypt. w: *The Seventh International Conference of Sustainable Architecture and Urban Development*. 2010. Amman, Jordania. 247-266.
175. Ali-Toudert F, Mayer H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*. 2005. 41(2): 94-108.
176. Abrahem SA, Taha HS, Hassan SA. Effect of water features on the microclimate of residential projects in a hot-arid climate: A comparative analysis. *Acta Sci. Pol. Administratio Locorum*. 2022. 5-13.
177. Lazzarini M, Molini A, Marpu PR, Ouarda TBMJ, Ghedira H. Urban climate modifications in hot-desert cities: The role of land-cover, local climate and seasonality. *Geophysical Research Letters*. 2015. 42(22): 9980-9989.
178. Elnabawi MH, Hamza N. Outdoor Thermal Comfort: Coupling Microclimatic Parameters with Subjective Thermal Assessment to Design Urban Performative Spaces. *Buildings*. 2020. 238.
179. Aljawabra F, Nikolopoulou M. Thermal comfort in urban spaces: a cross-cultural study in the hot arid climate. *International Journal of Biometeorology*. 2018. 1901-1909.
180. Givoni B. *Climate consideration in building and urban design*. John Willey & Sons. 1998.
181. Al-Azzawi S. *Descriptive, analytical and comparative study of traditional courtyard houses and modern non-courtyard houses*. Rozprawa doktorska. Londyn. University College London. 1984.
182. Abdulkareem HA. Thermal comfort through the microclimates of the courtyard. A critical review of the middle-eastern courtyard house as a climatic response. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2016: 662-674.
183. Hosseini SR, Nik Ethehad A, Uson , Armesto A. Iranian courtyard housing: The role of social and cultural patterns to reach the spatial formation in the light of an accentuated privacy. *ACE: Architecture, City and Environment*. 2015. 10(29): 11-30.
184. Ghobadian V, Taghi N, Ghodsi M. Chapter 5: Tehran: A Hot Arid Climate. w: *Bioclimatic Housing: innovative design for warm climates*. Oxon, Nowy York. Earthscan. 2008. 173-194.
185. Kamal MA. An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: Design Concepts and Architectural Intervention. *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*. 2012. p. 84-97.
186. St Clair P. Low-energy design in the United Arab Emirates – Building Design Principles. *Environment Design Guide*. 2009. 30: 1-10.
187. Gołębiewski M. Materiały stosowane w nurcie budownictwa naturalnego. *ZNUV*. 2019. 66(3): 63-71.
188. El-Bichri FZ, Sobhy I, Boucheфра I, Benhamou B, Chehouani H, Mghazli MO. Assessment of the impact of construction materials on the building's thermal behaviour and indoor thermal comfort in a hot and semi-arid climate. *Advances in Building Energy Research*. 2022. 711-735.
189. Brzezicki M. The Influence of Reflected Solar Glare Caused by the Glass Cladding of a Building: Application of Caustic Curve Analysis. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2012. 27(5): 347-357.
190. Lazzarini M, Marpu PR, Ghedira H. Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sensing of Environment*. 2013. 130: 136-152.
191. Mirzabaeв A, Wu J, Evans J, Garcia-Oliva F, Hussein IAG, Iqbal MH, et al. Desertification. w: Shukla PR, Skea J, Calvo Buendia E, Masson-Delmotte V, Pörtner HO, Roberts DC, et al.. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. 2019.
192. Koth SC, Kobas B, Bausch K, Auer T. Mitigating climate change through healthy discomfort. w: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2022. Berlin.

193. Taleb HM, Sharples S. Developing sustainable residential buildings in Saudi Arabia: A case study. *Applied Energy*. 2011. 88(1): 383-391.
194. Khelil S, Khelil AE, Bouzir AK, Berkouk D, Zemmouri N. Assessing the Effect of Building Skin Adaptability on Energy Consumption in Hot Arid Regions. *The Scientific Journal of King Faisal University*. 2022. 23(1): 36-43.
195. Aelenei L, Aelenei D, Romano R, Mazzucchelli ES, Brzezicki M, Rico-Martinez JM. *Case Studies – Adaptive Facade Network Delft*. TU Delft Open. 2018.
196. Lamb BM. *Letts Guide to Cacti of the World*. Londyn. Charles Letts Co Ltd. 1991.
197. Prisa D. Botany and uses of cacti. GSC. *Biological and Pharmaceutical Sciences*. 2022. 287-297.
198. Taylor CR. The eland and the oryx. *Sci Am*. 1969. 220: 88-97.
199. Halboth F, Roces F. The construction of ventilation turrets in *Atta vollenweideri* leaf-cutting ants: Carbon dioxide levels in the nest tunnels, but not airflow or air humidity, influence turret structure. *Plos One*. 2017. 12: 1-25.
200. Dean WRJ, Williams JB. Adaptations of birds for life in deserts with particular reference to Larks (ALAUDIDAE). *Transactions of the Royal Society of South Africa*. 2004. 59(2): 79-91.
201. Gebreyohanes GM, Assen MA. Adaptation Mechanisms of Camels (*Camelus dromedarius*) for Desert Environment: A Review. *J Vet Sci Technol*. 2017. 8(6): 486.
202. Cain JW, Krausman PR, Rosenstock SS, Turner JC. Mechanisms of Thermoregulation and Water Balance in Desert Ungulates. *Wildlife Society Bulletin*. 2006. 34(3): 570-581.
203. Benson S. Life and behaviour of wolves. The Arabian or Desert Wolf. *UKWCT*. 2009. 10(38): 12-13.
204. Willot Q, Simonis P, Vigneron JP, Aron S. Total Internal Reflection Accounts for the Bright Color of the Saharan Silver Ant. *PLoS One*. 2016. 11(4): 1-14.
205. Vukusic P, Hallam B, Noyes J. Brilliant Whiteness in Ultrathin Beetle Scales. *Science*. 2007. 315(5810): 348.
206. Park BK, Han SM, Han SE. Surpassing Cyphochilus scales in optical scattering strength by well-controlled electrospun nanostructures. *Express*. 2022. 12: 2529-2540.
207. Geiser F, Masters P. Torpor in Relation to Reproduction in the Mulgara, *Dasyercus cristicauda* (DASYURIDAE: MARSUPIALIA). *J. therm. Biol*. 1994. 19(1): 33-40.
208. Tracy RL, Walsberg GE. Kangaroo rats revisited: re-evaluating a classic case of desert survival. *Oecologia*. 2002. 133: 449-457.
209. Norris KS. The Ecology of the Desert Iguana *Dipsosaurus Dorsalis*. *Ecology*. 1953. 34(2): 265-287.
210. Weathers WW. The Ecology of the Desert Iguana *Dipsosaurus Dorsalis*. *Copeia*. 1970. 1970(3): 549-557.
211. Dawson TJ, Maloney SK. Fur versus feathers: The different roles of red kangaroo fur and emu feathers in thermoregulation in the Australian arid zone. *Australian Mammalogy*. 2004. 26: 145-151.
212. Cobb A, Cobb S. Do zebra stripes influence thermoregulation? *Journal of Natural History*. 2019. 53 (13-14): 863-879.
213. Russell Cole F, Wilson DE. *Felis margarita* (Carnivora: Felidae). *Mammalian Species*. 2015. 47(924): 63-77.
214. Zdun M, Frąckowiak H. Specyfika zaopatrzenia w krew mózgowia przeżuwaczy. *Med. Weter*. 2019. 75(7): 389-393.
215. Fick LG, Kucio TA, Fuller A, Matthee A, Mitchell D. The relative roles of the parasol-like tail and burrow shuttling in thermoregulation of free-ranging Cape ground squirrels, *Xerus inauris*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2009. 152(3): 334-340.
216. Hill RW, Veghte JH. Jackrabbit Ears: Surface Temperatures and Vascular Responses. *Science*. 2006. 194(4263): 436-438.
217. Baker MA. A Brain-cooling System in Mammals. *Scientific American*. 1979. 240(5): 130-139.

218. Kronfeld N, Shkolnik A. Adaptation to Life in the Desert in the Brown Hare (*Lepus capensis*). *Journal of Mammalogy*. 1996. 77(1): 171-178.
219. Weissenböck NM, Weiss CM, Schwammer HM, Kratochvil H. Thermal windows on the body surface of African elephants (*Loxodonta africana*) studied by infrared thermography. *Journal of Thermal Biology*. 2010. 35(4): 182-188.
220. Needham AD. *The role of the cardiovascular system of macropodid marsupials in thermoregulation*. Sydney. UNSW. 1982.
221. Hetem S, Strauss WM, Fick LG, Maloney SK, Meyer LCR, Fuller A, et al. Selective brain cooling in Arabian oryx (*Oryx leucoryx*): a physiological mechanism for coping with aridity? *J Exp Biol*. 2012. 215(22): 3917-3924.
222. Walsberg GE, Schmidt CA. Seasonal Adjustment of Solar Heat Gain in A Desert Mammal By Altering Coat Properties Independently of Surface Coloration. *J Exp Biol*. 1989. 142(1): 387-400.
223. Epstein H. *The Awassi sheep with special reference to the improved dairy type Rzym: Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 1985.
224. Macfarlane WV, Morris RJ, Howard B. Water economy of tropical merino sheep. *Nature*. 1956. 178(4528): 304-305.
225. Massoud D. Regional differences in the skin of the desert hedgehog (*Paraechinus aethiopicus*) with special reference to hair polymorphism. *Zoologischer Anzeiger*. 2020. 289: 87-95.
226. Thomas DH. Sandgrouse as models of avian adaptations to deserts. *S. Afr. J. Zool*. 1983. 19(2): 113-120.
227. Louw GN, Belonje PC, Coetze HJ. Renal function, respiration, heart rate and thermoregulation in the ostrich (*Struthio camelus*). *Scientific Papers of the Namib Desert Research Station*. 1972. 1972(42): 43-54.
228. Arad Z, Schwarzbaum A, Werner YL. Temperature selection and thermoregulation in the Moorish gecko, *Tarentola mauritanica*. *Amphibia-Reptilia*. 1997. 18(3): 269-282.
229. Vroonen J, Vervust B, Fulgione D, Maselli V, Van Damme R. Physiological colour change in the Moorish gecko, *Tarentola mauritanica* (Squamata: Gekkonidae): effects of background, light, and temperature. *Biological Journal of the Linnean Society*. 2012. 107(1): 182-191.
230. Whitfield CL, Livezey RL. Thermoregulatory Patterns in Lizards. *Physiological Zoology*. 1973. 46(4): 285-296.
231. Morrison RL, Sherbrooke WC, Frost-Mason SK. Temperature-Sensitive, Physiologically Active Iridophores in the Lizard *Urosaurus ornatus*: An Ultrastructural Analysis of Color Change. *Copeia*. 1996. 1996(4): 804-812.
232. Boyle SA, Reeder DR. *Colorado sagebrush: a conservation assessment and strategy*. Colorado. 2005.
233. Maloiy GMO, Kamau JMZ, Shkolnik A, Meir M, Arieli R. Thermoregulation and metabolism in a small desert carnivore: the Fennec fox (*Fennecus zerda*) (Mammalia). *J. Zool. Lond*. 1982. 198: 279-291.
234. Sidibe M, Williams JT. *Baobab. Adansonia digitata*. Wielka Brytania. Internationa Centre for Underutilised Crops. 2002.
235. Kanwal H, Hameed M, Nawaz T, Ahmad MSA, Younis A. Structural adaptations for adaptability in some exotic and naturalized species of Agavaceae. *Pak. J. Bot*. 2012. 44: 129-134.
236. Attenborough D. *The Private Life of Plants: A Natural History of Plant Behaviour*. Princeton University Press. 1995.
237. Downs JL, Black RA. Leaf Surface Characteristics and Gas Exchange in *Artemisia tridentata* subspecies *wyomingensis* and *tridentata*. w: *Proceedings shrubland ecotones*. USDA: Forest Service. 1999. 108-112.
238. Reimold RJ, Queen WH. *Ecology of Halophytes*. Londyn. Academic Press Inc. 1974.
239. Schirmer U, Breckle SW. The role of bladders for salt removal in some Chenopodiaceae (mainly *Atriplex* species). w: *Contributions to the ecology of halophytes*. Haga: DR W. JUNK. 1982. 215-231.

240. El-Shanhorey NA, Sorour MA. Effect of Irrigation Intervals and Shading on Growth Quality of *Beaucarnea recurvata* Plants. *Alexandria Science Exchange Journal*. 2019. 40 (OCTOBER-DECEMBER): 731-742.
241. Barthlott W, Mail M, Bhushan B, Koch K. Plant Surfaces: Structures and Functions for Biomimetic. *Nano-Micro Lett*. 2017. 9(23): 1-40.
242. Comstock JP, Mahall BE. Drought and changes in leaf orientation for two California chaparral shrubs: *Ceanothus megacarpus* and *Ceanothus crassifolius*. *Oecologia*. 1985. 65: 531-535.
243. Santos-Díaz MS, Pérez-Molphe E, Ramírez-Malagón R, Núñez-Palenius HG, Ochoa-Alejo N. *Mexican Threatened Cacti: Current Status and Strategies for their conservation*. Nowy Jork. Nova Science. 2010.
244. Jones LA. Anatomical adaptations of four *Crassula* species to water availability. *Bioscience Horizons: The International Journal of Student Research*. 2011. 4(1): 13-22.
245. Turner RM, Bowers JE, Burgess TL. *Sonoran Desert Plants: An Ecological Atlas*. Arizona. University of Arizona Press. 1995.
246. Nobel PS. Spine influences on PAR interception, stem temperature, and nocturnal acid accumulation by cacti. *Plant, Cell & Environment*. 1983. 6(2): 153-159.
247. Ehleringer JR, Björkman O. Pubescence and leaf spectral characteristics in a desert shrub, *Encelia farinosa*. *Oecologia*. 1978. 36: 151-162.
248. Bekele-Tesemma A. *Euphorbia abyssinica*. w: *Useful trees and shrubs of Ethiopia: Identification, Propagation and Management for 17 Agroclimatic Zones*. Nairobi. World Agroforestry Centre. 2007. 262-263.
249. Laver J, Clifford D, Vollen J. High performance masonry wall systems: principles derived from natural analogues. *WIT Trans. Ecol. Environ*. 2008. 116: 243-252.
250. Killingbeck T. Leaf Production Can Be Decoupled from Root Activity in the Desert Shrub *Ocotillo* (*Fouquieria splendens* Engelm.). *Am Midl Nat*. 1990. 124: 124-129.
251. Vigneron P, Rassart M, Vértesy Z, Kertész K, Sarrazin , Biró P, et al. Optical structure and function of the white filamentary hair covering the edelweiss bracts. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*. 2005. 71(1).
252. Zähr M, Friefrich D, Kloth TY, Goldmann G, Tributsch H. Bionic photovoltaic panels bio-inspired by green leaves. *Journal of Bionic Engineering*. 2010. 7: 284-293.
253. Romão MVV, Mansano VDF. Taxonomic review of the species of *Parkinsonia* (Leguminosae, Caesalpinioideae) from the Americas. *Rodriguésia*. 2021. 72: 1-21.
254. Uchytel RJ. *Prosopis velutina*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Missoula Fire Sciences Laboratory. 1990. [www.fs.usda.gov/database/feis/plants/cactus/cargig/all.html](http://www.fs.usda.gov/database/feis/plants/cactus/cargig/all.html).
255. Eskander S, Kettman KM, Ott J, Payne S. *Plant morphology and behavior of Simmondsia chinensis in the Colorado Desert*. Kalifornia. 2018.
256. Benzioni A, Dunstone RL. Jojoba: Adaptation to Environmental Stress and the Implications for Domestication. *The Quarterly Review of Biology*. 1986. 61(2): 177-199.
257. Fleming TH, Valiente-Banuet A. *Columnar Cacti and Their Mutualists: Evolution, Ecology, and Conservation*. University of Arizona Press. 2002.
258. Wildlife CDoFa. *Report to the Fish and Game Commision. Status Review of Western Joshua Tree (Yucca brevifolia)*. Kalifornia. 2022.
259. Grigg G, Beard L, Döriges B, Heucke J, Coventry J, Coppock A, et al. Strategic (adaptive) hypothermia in bull dromedary camels during rut; could it increase reproductive success? *Biol Lett*. 2009. 5: 853-856.
260. Schmidt-Nielsen K, Schmidt-Nielsen B, Jarnum SA, Houpt TR. Body Temperature of the Camel and Its Relation to Water Economy. *American Journal of Physiology*. 1956. 188(1): 103-112.

261. Shi NN, Tsai CC, Camino F, Bernard GD, Yu N, Wehner R. Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants. *Science*. 2015. 349(6245): 298-301.
262. Wu W, Lin S, Wei M, Huang J, Huang J, Xu H, et al. Flexible passive radiative cooling inspired by Saharan silver ants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2020. 210.
263. Domínguez-Oliva A, Ghezzi MD, Mora-Medina P, Hernández-Ávalos I, Jacome J, Castellón A, et al. Anatomical, physiological, and behavioral mechanisms of thermoregulation in elephants. *J Anim Behav Biometeorol*. 2022. 10(2233): 1-13.
264. Fuller A, Maloney SK, Mitchell G, Mitchell D. The eland and the oryx revisited: body and brain temperatures of free-living animals. *International Congress Series*. 2004. 1275: 275-282.
265. Caputa M. Dłaczego skóra twarzy zdradza nasze emocje? Termoregulacja mózgu. *Kosmos*. 1993. 42(2): 347-363.
266. Eyal E. Shorn and unshorn Awassi sheep IV. Skin temperature and changes in temperature and humidity in the fleece and its surface. *The Journal of Agricultural Science*. 1963. 60(2): 183-193.
267. Withers PC. Energy, water, and solute balance of the ostrich *Struthio camelus*. *Physiological Zoology*. 1983. 56(4): 568-579.
268. Yeaton RI, Karban R, Wagner HB. Morphological Growth Patterns of Saguaro (*Carnegiea gigantea*: Cactaceae) on Flats and Slopes in Organ Pipe Cactus National Monument, Arizona. *Southwestern Naturalist*. 1980. 25(3): 339-349.
269. Helmy O. *Carnegiea gigantea, saguaro*. w: Fire Effects Information System. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Missoula Fire Sciences. 2021.
270. Drezner TD. Variations on saguaro cactus (*Carnegiea gigantea*) spines length in wet and dry portions of their range. *Madroño*. 2017. 64(3): 93-98.
271. Drezner TD. Cactus surface temperatures are impacted by seasonality, spines and height on plant. *Environmental and Experimental Botany*. 2011. 74: 17-21.
272. Montalvo AM, Riordan EC, Beyers JL. *Plant Profile for Ceanothus crassifolius*. *Native Plant Recommendations for Southern California Ecoregions*. Kalifornia. 2020.
273. Didden-Zopf B, Nobel PS. High Temperature Tolerance and Heat Acclimation of *Opuntia bigelovii*. *Oecologia*. 1982. 52(2): 176-180.
274. Gibbs JG, Patten T. Plant Temperatures and Heat Flux in a Sonoran Desert Ecosystem. *Oecologia*. 1970. 5(3): 165-184.
275. Tesky JL. *Encelia farinosa*. w: Fire Effects Information System.: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Rocky Mountain Research Station. 1993.
276. Ehleringer JR, Mooney HA. Leaf Hairs: Effects on Physiological Activity and Adaptive Value to a Desert Shrub. *Oecologia*. 1978. 37(2): 183-200.
277. Matthews RF. *Ferocactus wislizeni*. w: Fire Effects Information.: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory. 1994.
278. Matthews RF. *Simmondsia chinensis*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory. 1994. <https://www.fs.usda.gov/database/feis/plants/shrub/simchi/all.html>.
279. Lizama-Tzec FI, Herrera-Zamora DM, Arés-Muzio O, Gómez-Espinoza VH, Santos-González I, Cetina-Dorantes M, et al. Electrodeposition of selective coatings based on black nickel for flat-plate solar water heaters. *Solar Energy*. 2019. 302-310.
280. Sung D. Smart Geometries for Smart Materials: Taming Thermobimetals to Behave. *Journal of Architectural Education*. 2016. 96-106.
281. Service/ECMWF CCC. *Surface air temperature for June 2023*. [Online]. dostęp: czerwiec 2023. <https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-june-2023>.



282. Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2001. 11(3): 231-52.
283. Witek M, Bednorz E, Forycka-Ławniczak H. Kontynentalizm termiczny w Europie. *Badania Fizjograficzne*. 2015. 66: 171-182.
284. Górka A, Górzeński R. Bezpośrednie chłodzenie wyparne budynków. *Rynek Instalacyjny*. 2014. (7): 69-73.
285. Pociask-Karteczka J. Ewapotranspiracja. w: *Zlewnia. Właściwości i procesy*. Kraków. UJ. 2006. 231-233.
286. Czermińska M. Zastosowanie metod taksonomicznych w klasyfikacji krajów Unii Europejskiej z punktu widzenia poziomu ich rozwoju gospodarczego. *Zeszyty Naukowe*. 2002. 149-161.
287. Gerlic K. *Zadaszenia Membranowe w Polsce - Swoboda Kształtowania*. Buchacz A. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. 2018.
288. Sung DK. *Prototyping a Self-Ventilating Building Skin with Smart Thermobimetals*. AIA Report on University Research. University of Southern California. 2011.
289. Sung DK. *Smart Sun-Shading: A Demonstration of Smart Thermobimetals as a Building Skin*. AIA Report. University of Southern California. 2011.
290. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, i in.. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Syst Rev*. 2021. 89.
291. Prawo Ochrony Środowiska. z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz. U. z 2019 r. poz. 1396, 1403, 1495, 1501, 1527, 1579, 1690, 1712).

## SPIS TABEL

---

<i>Tab. 1-1 Zestawienie publikacji odnoszących się do projektowanie inspirowanego naturą zgodnego z założeniami biomimikry, które zawiera prace przeglądowe (P) i eksperymentalne. Stosowane w nich metody badań oznaczono następującymi skrótami: B – biomimikra, BIM – modelowanie 3D (Revit), MP – modelowanie parametryczne (Grasshopper), PT – budowanie prototypów, SK – symulacje komputerowe (wybrane oprogramowanie). Oprac. własne.....</i>	<i>13</i>
<i>Tab. 1-2 Zestawienie publikacji dotyczących badania komfortu termicznego w regionach gorących i skrajnie suchych. Oznaczenia stosowanych przez autorów metod badań: BT – badania terenowe, MP – modelowanie parametryczne, SK – symulacje komputerowe (wybrane oprogramowanie). *Typ klimatu opisano w odniesieniu do klasyfikacji klimatów Koppena. Opracowanie własne. ....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 4-1 Zdolność pochłaniania promieniowania przez wybrane powierzchnie. Oprac. własne na podstawie: G. Flemming, Klimat-środowisko-człowiek, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1983. 63</i>	
<i>Tab. 4-2 Pomiar temperatur różnych nawierzchni wykonane w RPA w zależności od rodzaju i wystawy na słońce. Oprac. własne na podstawie: P. Gut i D. Ackerknecht, Climate Responsive Building – Appropriate Building Construction in Tropical and Subtropical Regions, St. Gallen: SKAT. ....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 5-1 Zestawienie zwierząt zidentyfikowanych podczas fazy II: odkrywania, które wykształciły mechanizmy adaptacyjne, pozwalające im na regulowanie temperatury lub unikanie nadmiernego promieniowania słonecznego. Opracowanie własne.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 5-2 Zestawienie roślin zidentyfikowanych podczas fazy II: odkrywania, które wykształciły mechanizmy adaptacyjne, pozwalające im na regulowanie temperatury lub unikanie nadmiernego promieniowania słonecznego. Oprac. własne. ....</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 5-3 Adaptacje poszczególnych badanych organizmów ze świata fauny. Opracowanie własne. ....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 5-4 Adaptacje poszczególnych badanych organizmów ze świata flory. Opracowanie własne. ....</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 5-5 Szablon karty „naturalnych wzorców projektowych”, służącej do opisu badanych strategii i mechanizmów oraz transferu wiedzy biologicznej na informacje przystępne dla wybranej grupy odbiorców. Opracowanie własne. ....</i>	<i>88</i>
<i>Tab. 5-6 Taksonomia wybranych organizmów ze wskazaniem dominującej funkcji. Opracowanie własne. ....</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 6-1 Tabela prezentująca funkcje, jak też możliwości i ograniczenia poszczególnych rozwiązań, które wpływają na ostateczny wybór przypadków poddawanych dalszemu opracowaniu. Oprac. własne.....</i>	<i>116</i>
<i>Tab. 6-2 Prezentacja wyników osiągniętych przez poszczególne rozwiązania po ewaluacji wobec „Zasad Życia”. Opracowanie własne. ....</i>	<i>124</i>

# SPIS RYSUNKÓW

---

Rys. 1-1 Schemat prezentujący kolejność prowadzonych badań. Opracowanie własne. ....	7
Rys. 1-2 Schemat prezentujący układ pracy. Opracowanie własne. ....	9
Rys. 1-3 Diagram ukazujący przebieg kwerendy bibliograficznej. Opracowanie własne. ....	11
Rys. 2-1 Trzy nierozłączne elementy niezbędne do właściwego praktykowania biomimikry: etos, ponowne połączenie i świadome naśladowanie. Za uprzejmością: Biomimicry 3.8, 2022. ....	21
Rys. 2-2 „Zasady Życia” (ang. Life Principles), traktowane przez praktyków biomimikry jako lekcje projektowania zaczerpnięte z natury, cele aspiracyjne oraz wzorzec i miara zrównoważonego rozwoju. Za uprzejmością: Biomimicry 3.8, 2022. ....	23
Rys. 2-3 Strategia projektowa: od Wyzwania do Biologii (ang. Challenge to Biology). Za uprzejmością: Biomimicry 3.8, 2022. ....	25
Rys. 2-4 Strategia: projektowanie informowane biologią (ang. Biology to Design). Za uprzejmością: Biomimicry 3.8, 2022. ....	26
Rys. 2-5 Taksonomia biomimikry – system klasyfikacji umożliwiający porządkowanie biologii w oparciu o pełnione przez różne organizmy funkcje. System został stworzony przez Biomimicry Institute w celu usystematyzowania wiedzy biologicznej na portalu AskNature.org, tak by stanowił on przystępną dla szerokiego grona naukowców bazę wiedzy. Za uprzejmością: Biomimicry 3.8, 2022. ....	28
Rys. 3-1 Schemat bioklimatyczny służący do klasyfikacji obszarów lądowych wg systemu Holdridge’a. Oprac. własne na podstawie: Peter Halasz, 2007. ....	34
Rys. 3-2 Mapa biomów z wyróżnieniem występowania biomów pustynnych na świecie. Oprac. własne na podstawie: <a href="https://www.alternatehistory.com/forum/attachments/biomemap-png.241781/">https://www.alternatehistory.com/forum/attachments/biomemap-png.241781/</a> . ....	35
Rys. 3-3 Schemat przedstawiający strukturę ekosystemu wraz z zachodzącymi w nim procesami obiegu materii i energii. Opracowanie własne. ....	36
Rys. 3-4 Obszary stref klimatów suchych i skrajnie suchych wg najbardziej powszechnej w Polsce klasyfikacji W. Okołowicza, uwzględniającej wielkość i rozkład opadów atmosferycznych oraz zmian temperatury powietrza w roku. Uwzględnione zostały również rozmieszczenie naturalnych zbiorowisk roślinnych, rozkład prądów morskich oraz stopień zasolenia wód. Oprac. własne na podstawie <a href="http://geografia24.pl/strefy-klimatyczne-na-ziemi/">http://geografia24.pl/strefy-klimatyczne-na-ziemi/</a> . ....	38
Rys. 3-5 Obszary stref klimatów gorących suchych wg klasyfikacji W. Köppena. Oprac. własne na podstawie <a href="http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/">http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/</a> . ....	39
Rys. 3-6 Przykładowy wykres rozkładu temperatur dobowych w regionach gorących i suchych. Oprac. własne na podstawie P. Gut i D. Ackerknecht, 1993 (107). ....	42
Rys. 3-7 Rozkład rocznej sumy opadów atmosferycznych na Ziemi. Oprac. własne na podstawie: <a href="http://lorenz.home.pl/matura_nowa/matura2006/komentarze08/Kom_CKE_geo_2008.pdf">http://lorenz.home.pl/matura_nowa/matura2006/komentarze08/Kom_CKE_geo_2008.pdf</a> . ....	43
Rys. 3-8 Schemat budowy wydmy sierpowatej (barchanu). Opracowanie własne. ....	44
Rys. 4-1 Wykres psychrometryczny dla poziomu morza w jednostkach SI. Umożliwia on m.in. odczytanie wilgotności względnej powietrza na podstawie pomiarów temperatury suchego (dry-bulb) i mokrego (wet-bulb) termometru. Za uprzejmością: Arthur Ogawa, 2009. ....	51

Rys. 4-2 Schematyczne przedstawienie tradycyjnego układu urbanistycznego charakterystycznego dla regionów pustynnych na przykładzie historycznej części miasta Yazd w Iranie. Opracowanie własne w oparciu o L. Zuaiter, 2015 (37).	53
Rys. 4-3 Wydajność cieplna tradycyjnego domu z dziedzińcem zlokalizowanego w Bagdadzie sporządzoną w oparciu o przeprowadzone przez Al-Azzawi pomiary temperatur (161). U góry: Wydajność cieplna budynku w okresie południa. U dołu: Wydajność cieplna budynku podczas nocy. Opracowanie własne na podstawie: H. A. Abdulkareem, 2016 (160).	56
Rys. 4-4 Przykład tradycyjnej zabudowy arabskiej z dziedzińcem oraz czynniki, wpływające na efektywność tego rozwiązania. Opracowanie własne na podstawie M. Mohamed, 2010 (156).	57
Rys. 4-5 Sezonowy nomadyzm wewnętrzny. Przestrzenie letnie i zimowe. Oprac. własne na podstawie S. R. Hosseini i in. 2015 (161).	58
Rys. 4-6 Schemat przedstawiający sposób działania wentylacji pasywnej w przypadku stosowania przegród dwuwarstwowych. Oprac. własne na podstawie P. Gut i D. Ackerknecht, 1993 (107).	60
Rys. 5-1 Schemat prezentujący przebieg fazy II. Opracowanie własne	72
Rys. 5-2 Po lewej: a) Ilustracja zasady działania mechanizmu termoregulacyjnego wielbłąda. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie: asknature.org.	89
Rys. 5-3 Po lewej: a) Zasada odbijania promieniowania przez włosy saharyjskiej srebrnej mrówki. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie Shi i in. 2015 (235).	90
Rys. 5-4 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu termoregulacyjnego emu. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie Dawson i Maloney, 2004 (185).	91
Rys. 5-5 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu termoregulacyjnego słonia. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie Domínguez-Oliva i in. 2022 (237).	92
Rys. 5-6 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu wybiórczego chłodzenia mózgu. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie OpenLearn.	93
Rys. 5-7 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu termoregulacyjnego furta owcy Awassi. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podstawie Epstein, 1985 (197).	94
Rys. 5-8 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu termoregulacyjnego strusia. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Opracowanie własne.	95
Rys. 5-9 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu termoregulacyjnego saguaro. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Opracowanie własne.	96
Rys. 5-10 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu regulującego ilość pochłanianego przez liście promieniowania słonecznego. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Opracowanie własne.	97
Rys. 5-11 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu regulującego ilość pochłanianego przez opuncję promieniowania słonecznego. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Opracowanie własne.	98
Rys. 5-12 Po lewej: a) Działanie mechanizmu regulującego ilość pochłanianego promieniowania przez liście Encelii. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne na podst. Ehleringer i Björkman, 1978 (221).	99
Rys. 5-13 Po lewej: a) Zasada działanie mechanizmu regulującego ilość pochłanianego promieniowania słonecznego przez feroaktusa. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Oprac. własne.	100

<i>Rys. 5-14 Po lewej: a) Zasada działania mechanizmu regulującego ilość pochłanianego promieniowania przez liście jojoby. Po prawej: b) Ilustracja abstrakcyjnej zasady projektowej. Opracowanie własne. ....</i>	<i>101</i>
<i>Rys. 6-1 Schemat prezentujący matrycę procesu „burzy mózgów”. Opracowanie własne. ....</i>	<i>106</i>
<i>Rys. 6-2 Schemat prezentujący efekty procesu myślowego towarzyszącego tworzeniu rozwiązania inspirowanego naturą. Opracowanie własne. ....</i>	<i>107</i>
<i>Rys. 6-3 Ilustracja koncepcji projektowanego systemu inspirowanego mechanizmami adaptacyjnymi karnegii olbrzymiej i ferokaktusa. Opracowanie własne. ....</i>	<i>108</i>
<i>Rys. 6-4 Ilustracja koncepcji projektowanego systemu inspirowanego mechanizmami adaptacyjnymi karnegii olbrzymiej i cylindropuncji. Opracowanie własne. ....</i>	<i>109</i>
<i>Rys. 6-5 Ilustracja koncepcji działania projektowanego rozwiązania inspirowanego mechanizmem adaptacyjnym oryksa południowego. Opracowanie własne. ....</i>	<i>110</i>
<i>Rys. 6-6 Ilustracja koncepcji budowy i działania projektowanych płytek inspirowanych mechanizmami adaptacyjnymi saharyjskiej srebrnej mrówki i simondsji kalifornijskiej. Opracowanie własne. ....</i>	<i>111</i>
<i>Rys. 6-7 Ilustracja koncepcji budowy i działania projektowanych płytek inspirowanych mechanizmem adaptacyjnym Encelii farinosy. Opracowanie własne. ....</i>	<i>112</i>
<i>Rys. 6-8 Ilustracja koncepcji działania projektowanego rozwiązania inspirowana mechanizmem adaptacyjnym słonia afrykańskiego. Opracowanie własne. ....</i>	<i>113</i>
<i>Rys. 6-9 Ilustracja koncepcji projektowanej przegrody inspirowana mechanizmami adaptacyjnymi wielbłąda jednogarbego, owcy Awassi i karnegii olbrzymiej. Opracowanie własne. ....</i>	<i>114</i>
<i>Rys. 6-10 Ilustracja koncepcji projektowanych płyt inspirowanych mechanizmami adaptacyjnymi strusia czerwonoskórego i emu. Opracowanie własne. ....</i>	<i>115</i>
<i>Rys. 6-11 Ilustracja prezentująca koncepcję działania rozwiązania I. Opracowanie własne. ....</i>	<i>118</i>
<i>Rys. 6-12 Ilustracja prezentująca koncepcję działania rozwiązania II. Opracowanie własne. ....</i>	<i>120</i>
<i>Rys. 6-13 Ilustracja pokazująca koncepcję działania rozwiązania III. Opracowanie własne. ....</i>	<i>122</i>

## ZAŁĄCZNIKI

---

Zał. 1 – Tabela ewaluacji rozwiązania uszczegółowionego nr 1. ....	TABELA.1
Zał. 2 – Tabela ewaluacji rozwiązania uszczegółowionego nr 2. ....	TABELA 2
Zał. 3 – Tabela ewaluacji rozwiązania uszczegółowionego nr 3. ....	TABELA 3
Zał. 4 – Zestawienie zdjęć 34 badanych gatunków zwierząt. ....	PL 4.1-4.7
Zał. 5 – Zestawienie zdjęć 29 badanych gatunków roślin. ....	PL 5.1-5.6

## **ZAŁĄCZNIK Nr 1**

### **Tabela nr 1**

#### **Ocena rozwiązania uszczegółowionego nr I**

Szczelne komory z pompowanymi membranami

**Typ systemu:** aktywny

**Krótką charakterystyka:** system składający się z pojedynczych pionowych, łączonych ze sobą modułów, które występują w dwóch wersjach – przezroczystej i nieprzezierniej. Ponadto projektowane moduły mają także kilka wariantów, które charakteryzuje odmienna szerokość i głębokość, dzięki czemu mogą być one montowane na poszczególnych ścianach w zależności intensywności promieniowania oraz kąta padania promieni słonecznych.

ZASADY ŻYCIA (KATEGORIE I KRYTERIA)			PUNKTACJA			ROZWIĄZANIE I. <i>Szczelne komory z pompowanymi membranami</i>
OCENA ŁĄCZNA:		81,5%	44	/	54	UZASADNIENIE OCENY
<b>Tworzenie warunków sprzyjających rozwojowi życia:</b>		<b>3</b>				
1.1.	Elementy i aspekty rozwiązania są zoptymalizowane, a nie zmaksymalizowane.		0,5			Dzięki pełnionej funkcji, jaką jest ochrona przed promieniowaniem, rozwiązanie przyczynia się do tworzenia optymalnego komfortu termicznego wewnątrz budynków, co odpowiada potrzebom ich użytkowników. Modułowość rozwiązania umożliwiła optymalizowanie zużycia materiału oraz kosztów produkcji, transportu, montażu i utrzymania. Zasada działania systemu, polegająca na okresowym spuszczeniu i pompowaniu powietrza, wymaga jednak zastosowania wielu dodatkowych elementów, niezbędnych do jego działania (np. czujniki i sprężarki) oraz energii elektrycznej do jego zasilania.
1.2.	Rozwiązanie jest kompatybilne z innymi komponentami systemu w sposób korzystny dla ekosystemu.		1			Rozwiązanie, przez regulację ilości promieniowania oraz grubości bufora powietrznego, wpływa pozytywnie na utrzymanie optymalnej temperatury przegrody i poprawę komfortu cieplnego wewnątrz budynków. Redukuje też koszty i zużycie energii.
1.3.	Rozwiązanie przyczynia się do wydłużenia cyklu życiowego systemu.		1			Rozwiązanie chroni elementy budynku przed działaniem czynników zewnętrznych, tym samym przedłużając ich trwałość.
<b>OGÓŁEM:</b>		<b>83,3%</b>	<b>2,5</b>			
<b>Ewolucja w celu przetrwania:</b>		<b>5</b>				
2.1.	Sukces przyjętej strategii zależy od tego, czy przyczynia się ona do funkcjonowania danego rozwiązania w długim okresie czasu.		0,5			Rozwiązanie ogranicza potrzebę korzystania z urządzeń klimatyzacyjnych i wykorzystuje powietrze jako bufor, jednak do zasilania wymaga zużycia energii elektrycznej. Zaletą jest to, że energia ta pochodzi ze źródeł odnawialnych (Słońca).
a.	Stosowane materiały, systemy i technologie są oparte o sprawdzone, działające rozwiązania z perspektywy środowiskowej, społecznej i finansowej.		1			Rozwiązanie oparte jest na nowym pomysłu użycia membran, które są już z powodzeniem stosowane w architekturze, zapewniając komfort termiczny wewnątrz budynków. Folie te są w pełni poddawane recyklingowi i pozwalają ograniczać koszty utrzymania budynków.
b.	Innowacje są tworzone poprzez wzajemną wymianę informacji oraz integrowanie interdyscyplinarnych osiągnięć.		1			Projektowane rozwiązanie wykorzystuje materiały i technologie, będące wynikiem badań oraz osiągnięć z zakresu różnych dziedzin. Jest ono wynikiem przeprojektowania istniejących już konstrukcji membranowych.
i.	Innowacje tworzone są poprzez syntetyzowanie nowych osiągnięć / danych ze źródeł zewnętrznych.		1			Rozwiązanie zostało stworzone w oparciu o analizy istniejących konstrukcji membranowych.
ii.	Błędy są wykorzystywane jako narzędzie do wyciągania wniosków, a w efekcie generowania nowych rozwiązań.		1			Wady istniejących rozwiązań membranowych zostały uwzględnione i posłużyły do generowania nowych pomysłów.
<b>OGÓŁEM:</b>		<b>90,0%</b>	<b>4,5</b>			
<b>Integrowanie rozwoju ze wzrostem:</b>		<b>6</b>				
3.1.	Zarówno rozwój rozwiązania, jak i jego skala są zoptymalizowane.		1			Rozwiązanie składa się z modułów, jakie stanowią szczelne komory zamknięte membraną, które następnie łączone są w niezależne zespoły, tworzące powłokę ścian, a w efekcie obudowę budynku, wpływającą na optymalizowanie jego działania.
a.	Komponenty są modułowe, dzięki czemu możliwa jest ich rozbudowa o dodatkowe elementy.		1			Poszczególne moduły są ze sobą łączone a pomiędzy nimi rozprowadzane jest powietrze. Z uwagi na to, że powłoka przegrody składa się z wielu zespołów możliwe jest dokładanie kolejnych.
b.	Rozwiązanie jest tworzone z myślą o kształcie, aby optymalizować wykorzystanie materiału bez produkowania odpadów.		1			Prostokątny kształt, różne szerokości (prefabrykowanych) modułów oraz ich niewielki rozmiar sprawiają, że ich montaż oraz łączenie są łatwe a ponadto nie powodują produkowania odpadów.
c.	Komponenty systemu samoorganizują się jednocześnie, aby przynieść korzyści całemu systemowi.		1			Poszczególne zespoły stworzone z modułów samoistnie reagują na zachodzące zmiany. Poprzez jednakową reakcję powłoka dostosowuje się do zachodzących zmian w jednym czasie.
i.	Rozwiązanie stwarza poszczególnym elementom możliwości, sprzyjające powstawaniu nowych powiązań.		1			Poszczególne elementy rozwiązania (np. czujnik, sprężarka, komory) współdziałają ze sobą, będąc od siebie zależnymi. Ponadto sama powłoka poprzez pełnione funkcje oddziałuje również na inne części budynku.
ii.	Rozwiązanie tworzy alternatywną przestrzeń dla rozwoju (np. nowe pomysły, nowe miejsca pracy).		0,5			Choć elewacje membranowe są obecne na rynku architektonicznym i budowlanym już od wielu lat, to projektowane rozwiązanie może wskazać nowe kierunki prowadzenia badań.
<b>OGÓŁEM:</b>		<b>91,7%</b>	<b>5,5</b>			
<b>Adaptowanie się do zmiennych warunków:</b>		<b>8</b>				
4.1.	Rozwiązanie dostosowuje się do nagłych zmian czasowych i przestrzennych.		1			System dmuchanych membran pozwala przekształcać powłokę, dostosowując ją do panujących w danym momencie warunków. Rozwiązanie jest proste do zdemontowania, stąd może być dopasowane do nowych układów przestrzennych.



	a.	Działanie rozwiązania zakłada wymianę: energii, informacji i materii. Obserwacja tego procesu służy ulepszeniu systemu.	1			Stosowane w rozwiązaniu czujniki regulują ilość promieniowania docierającego do przegrody oraz mierzą jej temperaturę. Zbierane dane służą do ulepszania działania systemu poprzez wywoływanie natychmiastowych reakcji.
	b.	Rozwiązanie odporne jest na nieoczekiwane pojawiające się problemy, przy jednoczesnym utrzymaniu ruchu (działania).	1			Awaria pojedynczego modułu nie wpływa na działanie całego systemu, gdyż w obrębie ściany znajduje się wiele osobno zasilanych zespołów, składających się z kilku modułów.
	i.	Działanie utrzymywane jest dzięki stosowaniu różnych rozwiązań dla funkcji krytycznych.		0,5		Wspomaganie regulacji temperatury przegrody możliwe jest zarówno dzięki sezonowym zmianom grubości bufora jak też zacienianej powierzchni. Jednak pompowanie powietrza do modułów możliwe jest wyłącznie dzięki sprężarkom.
	ii.	Funkcja utrzymana jest przez powielanie elementów krytycznych.	1			Każdy zespół, składający się z kilku modułów posiada sprężarkę, która zaopatruje go w sprężone powietrze.
	iii.	Elementy pełniące poszczególne funkcje są rozproszone i zdecentralizowane.	1			W obrębie systemu występuje kilka rozmieszczonych w różnych miejscach sprężarek, paneli kontrolnych i wiele czujników, które odpowiadają za ciągłość działania systemu.
	c.	Rozwiązanie tworzy wiele form, procesów i systemów, by zapewnić jego funkcjonalność przy zmianach czasowych i przestrzennych.	1			Przewiduje się, że rozwiązanie będzie składało się z dwóch rodzajów modułów: przezroczystego i matowego, które będą mogły być dostosowane do układu elewacji. Adaptacja powłoki do zmian czasowych pozwala stale utrzymywać jej funkcjonalność.
	d.	Rozwiązanie dostosowuje się do danych warunków wraz z innymi częściami systemu, aby zwiększyć poziom adaptacji.	1			Rozwiązanie, dzięki zmianie kształtu powłoki zewnętrznej oraz grubości bufora reguluje ilość energii cieplnej pochłanianej i uwalnianej przez budynek.
		<b>OGÓŁEM:</b>	<b>93,8%</b>	<b>7,5</b>		
<b>Dostosowanie do lokalnych warunków i reagowanie na nie:</b>			<b>14</b>			
<b>5.1.</b>		Rozwiązanie wpasowuje się i integruje się z systemem, dlatego też traktowane jest jako jego element a nie pojedyncza jednostka.	1			Rozwiązanie stanowi element budynku montowany do ściany konstrukcyjnej i wpływa bezpośrednio na działanie przegrody. Zmiany kształtu powłoki i grubości bufora pomagają regulować temperaturę przegrody, wpływając na efektywność budynku.
	a.	Rozwiązanie wykorzystuje ograniczenia jako nowe możliwości do tworzenia innowacyjnych rozwiązań dostosowanych do kontekstu.		0,5		Rozwiązanie uwzględnia lokalne uwarunkowania - brak wody i duże nasłonecznienie. Z tego względu jako ośrodek zmieniający objętość powłoki wybrane zostało powietrze. Działanie tego systemu oparte jest jednak na sprężarkach, które choć zasilane są energią słoneczną, to wciąż wymagają jej sporego zużycia.
	i.	Materiały użyte w rozwiązaniu są lokalne i dostępne w dużych ilościach.		0		Stosowane materiały (stal, aluminium, membrany) nie są dostępne lokalnie. Muszą być sprowadzane z zewnątrz, co często wymaga pokonywania dużych odległości, głównie przy użyciu transportu lądowego i morskiego.
	ii.	Rozwiązanie przechwytuje, magazynuje lub wykorzystuje swobodnie dostępną energię.	1			Do działania rozwiązania (zasilania sprężarek) wykorzystywana jest energia słoneczna produkowana przez panele fotowoltaiczne.
	b.	Rozwiązanie wspiera współdziałanie oraz tworzenie obustronnie korzystnych relacji z systemem.	1			Rozwiązanie oparte jest na niezależnych modułach, które współdziałają ze sobą. Projektowany system współgra też z pozostałymi elementami budynku np. wykorzystuje ściany jako konstrukcję nośną i watswę akumulacyjną, zapewniając jej ochronę przed czynnikami zewnętrznymi.
	i.	Rozwiązanie tworzy nowy obszar badań, a nie jest kolejną iteracją istniejących już systemów.		0,5		Rozwiązanie stanowi alternatywę dla powszechnie stosowanych obecnie membranowych powłok budynków.
	ii.	Rozwiązanie stanowi część systemu, umożliwiając elementom systemu korzystne wpływanie na siebie nawzajem.	1			Rozwiązanie stanowi zintegrowaną z budynkiem powłokę zewnętrzną, która wraz z innymi elementami budynku poprawia jego efektywność energetyczną i funkcjonalność.
	iii.	Rozwiązanie wzmacnia powiązania w ramach systemu i poza nim poprzez wzajemne oddziaływania.	1			Rozwiązanie chroni budynek i jego elementy przed czynnikami zewnętrznymi, głównie wahaniami temperatur oraz promieniowaniem, ograniczając potrzebę korzystania z systemów klimatyzacyjnych. Wpływa na poprawę komfortu odczuwalnego przez użytkowników oraz redukcję kosztów utrzymania budynku.
	iv.	Rozwiązanie rozwija się wraz z innymi częściami systemu.	1			Rozwiązanie charakteryzują różne tryby działania, które przyjmuje w zależności od panujących warunków i potrzeb użytkowników. Ponadto jest ono oparte na różnych rodzajach modułów, dzięki którym można dostosować je do orientacji budynku (węższe i głębsze moduły od południa) oraz rodzaju przegrody (moduły matowe i transparentne).
	c.	Rozwiązanie wykorzystuje istniejące cykle (np. pogodowe, dobowe, sezonowe, kulturowe).	1			Działanie rozwiązania jest zależne od okresowych zmian temperatury i nasłonecznienia, do których się ono dostosowuje.
	d.	Rozwiązanie szybko wykrywa sygnały (informacje zwrotne) aby wywoływać reakcje.	1			Umieszczone w przegrodzie czujniki i sterowniki wysyłają sygnały, których zadaniem jest uruchamianie systemu pompującego lub odpompowującego powietrze z membran.
	i.	Rozwiązanie szybko i odpowiednio reaguje na otrzymywane informacje zwrotne.	1			System, uruchamiający przepływ powietrza zostaje natychmiastowo włączony lub zatrzymany po otrzymaniu odpowiednich sygnałów ze sterowników.
	ii.	Rozwiązanie wykorzystuje metodę nauki poprzez naśladowanie, próby i błędy (np. AI). Gromadzi wiedzę, która pozwala ulepszać jego działanie.		0,5		Założeniem projektu jest monitorowanie i testowanie jego efektywności oraz optymalizowanie jego cyklu życiowego a w efekcie jego dalsze rozwijanie i tworzenie alternatywnych rozwiązań.

	iii.	Rozwiązanie przekazuje sygnały, odbiera je i odpowiednio reaguje, sprawiając, że wszystkie trzy elementy tworzą działający ciąg przyczynowo-skutkowy.	1			W rozwiązaniu sygnały wysyłane przez dopasowane do systemu czujniki i sterowniki, są odbierane przez sprężarki, wywołując ich reakcję, czyli pompowanie, bądź spuszczenie powietrza spomiędzy membran, tworzących powłokę.
		<b>OGÓŁEM:</b>	<b>82,1%</b>	<b>11,5</b>		
		<b>Używanie przyjaznej życiu chemii:</b>	<b>6</b>			
6.1.		Elementy rozwiązania w całym cyklu życia wykorzystują chemię, która nie wywiera negatywnego wpływu na naturalne procesy życiowe.		0,5		Choć stosowane w rozwiązaniu materiały podlegają recyklingowi lub nadają się do ponownego wykorzystania, to ich początkowa produkcja oraz procesy związane z przetwarzaniem wywierają negatywny wpływ na środowisko.
	a.	Rozwiązanie tworzy ograniczoną liczbę elementów, które są w odpowiedni i innowacyjny sposób łączone, aby właściwie działać.	1			Rozwiązanie składa się z kilku elementów, które łączone są ze sobą w prosty sposób tworzą szczelną pompowaną komorę, wewnątrz której objętość powietrza ulega zmianie w reakcji na zmianę czynników zewnętrznych.
	i.	Rozwiązanie wykorzystuje powszechne i bezpieczne elementy, które są składane w nowy sposób. Nie wymaga tworzenia nowych, potencjalnie toksycznych materiałów.	1			Rozwiązanie oparte jest na istniejących, przebadanych materiałach i technologiach, które poddawane są ciągłej optymalizacji.
	b.	Rozkład rozwiązania skutkuje wyłącznie produktami ubocznymi, które nie powodują żadnych szkód.		0,5		Choć wszystkie elementy rozwiązania mogą być odzyskane, to same procesy związane z rozpadem poszczególnych elementów mogą wywierać negatywny wpływ na środowisko.
	c.	Wszystkie procesy, towarzyszące tworzeniu i działaniu rozwiązania wykorzystują wodę jako rozpuszczalnik.		0		Stosowane membrany są tworzone w wyniku obróbki materiałów syntetycznych.
	i.	Reakcje chemiczne w cyklu życia rozwiązania zachodzą bez udziału katalizatorów i prowadzą do samoorganizacji systemu.		0		Procesy związane z produkcją i przetwarzaniem stosowanych materiałów wymagają wkładu energii mechanicznej i elektrycznej do stworzenia ich ostatecznej formy. Również działanie systemu oparte jest na zasilaniu elektrycznym.
		<b>OGÓŁEM:</b>	<b>50,0%</b>	<b>3</b>		
		<b>Oszczędne i wydajne wykorzystywanie materiałów i energii:</b>	<b>12</b>			
7.1.		Wszystkie wykorzystywane zasoby i możliwości są używane umiejętnie i oszczędnie.		0,5		Choć rozwiązanie zasilane jest energią słoneczną, to ilość energii potrzebna do działania całego systemu jest stosunkowo duża. Stosowane materiały mogą natomiast pochodzić z obiegu zamkniętego - recyklingu lub ponownego użycia.
	a.	Rozwiązanie uwzględnia lokalne uwarunkowania - możliwości i ograniczenia.		0,5		Choć rozwiązanie jako źródło energii wykorzystuje dostępną przez cały rok energię słoneczną, to materiały, z których jest zbudowane, zwykle nie są lokalne i muszą być transportowane na znaczne odległości.
7.2.		Rozwiązanie spełnia potrzeby funkcjonalne przy minimalnym nakładzie materiałów i energii w trakcie całego cyklu życia.		0,5		Pomimo tego, że rozwiązanie optymalizuje zużycie stosowanych materiałów potrzebnych do pełnienia przez nie określonej funkcji, to nakład energii potrzebny do utrzymania działania systemu jest relatywnie duży.
	a.	Rozwiązanie pełni więcej niż jedną funkcję.	1			Rozwiązanie chroni przegrodę przed czynnikami zewnętrznymi oraz wspomaga regulację jej temperatury.
	b.	Rozwiązanie opiera się na łatwości montażu i prostych procesach produkcyjnych o minimalnym zużyciu energii.		0,5		Rozwiązanie składa się z prostych do montażu i demontażu elementów, które bez problemu mogą zostać poddane naprawie lub wymianie. Część procesów produkcyjnych materiałów np. stali wymaga jednak użycia dużej ilości energii, potrzebnej również do późniejszego transportu.
	i.	Przyjęte strategie zmniejszają poziom temperatury, ciśnienia lub czasu reakcji wymagane do działania procesów.	1			Stosowane czujniki i sterowniki pozwalają zautomatyzować pracę systemu a tym samym zredukować czas, energię i koszty, związane z manualnym sterowaniem systemu.
	c.	Stosowane w rozwiązaniu elementy i materiały pochodzą z ponownego użycia lub recyklingu.	1			Wszystkie materiały stosowane w rozwiązaniu pochodzą z recyklingu lub są ponownie zastosowane.
	i.	Materiały nadają się do recyklingu lub kompostowania.	1			Wszystkie stosowane materiały nadają się do recyklingu.
	ii.	Poszczególne elementy nadają się do demontażu, przekształcenia lub ponownego użycia.	1			Cały system, składający się z osobnych części, które są ze sobą łączone jest łatwo demontowalny, w związku z tym poszczególne elementy mogą być ponownie użyte.
	d.	Rozwiązanie wykorzystuje kształt i informacje w celu ograniczenia zużycia materiałów i energii.	1			Stosowane formy pozwalają optymalizować ilość wykorzystywanych materiałów oraz redukować ilość energii zużywanej przez budynek.
	i.	Forma rozwiązania służy pełnionej przez nie funkcji.	1			Zmienna pozycja membrany pozwala na optymalizowanie zysków energii z promieniowania, a ilość znajdującego się wewnątrz powietrza umożliwia sterowanie grubością bufora.
	ii.	Rozwiązanie wykorzystuje ograniczenia jako okazję do rozwoju innowacji.		0,5		Rozwiązanie jest tworzone z myślą o niewielkich zasobach wody w regionach pustynnych. Jego wadą są jednak wyższe koszty związane z wykonaniem i użytkowaniem w porównaniu do konwencjonalnych izolacji wykonywanych w systemie mokrym.
		<b>OGÓŁEM:</b>	<b>79,2%</b>	<b>9,5</b>		

## **ZAŁĄCZNIK Nr 2**

### **Tabela nr 2**

#### **Ocena rozwiązania uszczegółowionego nr II**

Fasada kinetyczna pokryta tkaniną techniczną

**Typ systemu:** aktywny

**Krótką charakterystyka:** fasada kinetyczna składająca się z pojedynczych, niezależnie sterowanych, pionowych modułów, zasilana energią słoneczną. Pojedynczy moduł składa się z układu sterowania oraz poruszanych przez niego elementów, na które naciągnięta jest tkanina techniczna. Kształt powłoki wykonanej z elastycznego materiału dostosowywany jest do intensywności promieniowania oraz kąta padania promieni słonecznych.

ZASADY ŻYCIA (KATEGORIE I KRYTERIA)			PUNKTACJA			ROZWIĄZANIE II. <i>Fasada kinetyczna pokryta tkaniną techniczną</i>
OCENA ŁĄCZNA:		77,8%	42	/	54	UZASADNIENIE OCENY
<b>Tworzenie warunków sprzyjających rozwojowi życia:</b>		<b>3</b>				
1.1.	Elementy i aspekty rozwiązania są zoptymalizowane, a nie zmaksymalizowane.			0,5		Rozwiązanie wpływa na optymalizowanie komfortu termicznego wewnątrz budynku poprzez ochronę przegrody przed promieniowaniem słonecznym oraz regulowanie jej temperatury poprzez okresową obecność bufora cieplnego. Przyjęta strategia sterowania systemem (mechaniczna) wymaga jednak sporych nakładów energetycznych i finansowych.
1.2.	Rozwiązanie jest kompatybilne z innymi komponentami systemu w sposób korzystny dla ekosystemu.		1			Zmiana kształtu powłoki zewnętrznej reguluje ilość promieniowania docierającą do przegrody oraz zależnie od okresu powoduje obecność bufora cieplnego lub szczeliny wentylacyjnej, wspomagając w ten sposób regulację temperatury przegrody i wpływając na poprawę komfortu termicznego wewnątrz budynku.
1.3.	Rozwiązanie przyczynia się do wydłużenia cyklu życiowego systemu.		1			Rozwiązanie chroni elementy budynku przed działaniem czynników zewnętrznych, tym samym przedłużając ich trwałość. Jego elementy są łatwe do demontażu i ponownego użycia.
<b>OGÓŁEM:</b>		<b>83,3%</b>	<b>2,5</b>			
<b>Ewolucja w celu przetrwania:</b>		<b>5</b>				
2.1.	Sukces przyjętej strategii zależy od tego, czy przyczynia się ona do funkcjonowania danego rozwiązania w długim okresie czasu.			0,5		Rozwiązanie ogranicza potrzebę korzystania z urządzeń klimatyzacyjnych i wykorzystuje warstwę powietrza jako bufor, jednak jego działanie oparte jest na systemach mechanicznych, których koszty i zapotrzebowanie na energię są stosunkowo wysokie. Zaletą jest jednak to, że energia ta pobierana jest ze źródeł odnawialnych (Słońca).
a.	Stosowane materiały, systemy i technologie są oparte o sprawdzone, działające rozwiązania z perspektywy środowiskowej, społecznej i finansowej.			0,5		Rozwiązanie w nowy sposób wykorzystuje sprawdzone materiały i technologie, które były już stosowane w projektach fasad kinetycznych i wentylowanych. Stosowane systemy mechaniczne są jednak dość energochłonne i kosztowne.
b.	Innowacje są tworzone poprzez wzajemną wymianę informacji oraz integrowanie interdyscyplinarnych osiągnięć.		1			Rozwiązanie wykorzystuje materiały i technologie, będące wynikiem badań oraz osiągnięć z zakresu różnych dziedzin. Integruje wiedzę i pomysły z zakresu projektowania fasad kinetycznych inspirowanych naturą, opartych na systemach mechanicznych.
i.	Innowacje tworzone są poprzez syntetyzowanie nowych osiągnięć / danych ze źródeł zewnętrznych.		1			Rozwiązanie integruje pracę siłowników, powszechnie stosowanych w systemach mechanicznych, z materiałem jakim są powlekane tkaniny techniczne. Połączenie to sprawia, że możliwe jest osiągnięcie pożądanego działania rozwiązania.
ii.	Błędy są wykorzystywane jako narzędzie do wyciągania wniosków, a w efekcie generowania nowych rozwiązań.		1			Wady istniejących systemów opartych na siłownikach są brane pod uwagę w procesie tworzenia i pozwalają na generowanie nowych pomysłów.
<b>OGÓŁEM:</b>		<b>80,0%</b>	<b>4</b>			
<b>Integrowanie rozwoju ze wzrostem:</b>		<b>6</b>				
3.1.	Zarówno rozwój rozwiązania, jak i jego skala są zoptymalizowane.		1			Rozwiązanie składa się z niewielkich pionowych modułów, które montowane są obok siebie, tworząc powłokę poszczególnych ścian a w efekcie obudowę budynku, która pozytywnie wpływa na jego działanie.
a.	Komponenty są modułowe, dzięki czemu możliwa jest ich rozbudowa o dodatkowe elementy.		1			Nezależne moduły, które tworzą wspólnie zasilane zespoły, umożliwiają łatwą rozbudowę systemu o dodatkowe elementy.
b.	Rozwiązanie jest tworzone z myślą o kształcie, aby zoptymalizować wykorzystanie materiału bez produkowania odpadów.		1			Prosty kształt oraz niewielki rozmiar modułu umożliwia bezodpadowe łączenie elementów m.in. tkanin, które mogą stanowić ścinki większych materiałów. Rozwiązanie nie wymaga tworzenia nowych linii produkcyjnych.
c.	Komponenty systemu samoorganizują się jednocześnie, aby przynieść korzyści całemu systemowi.		1			Poszczególne zespoły stworzone z modułów samoistnie reagują na zachodzące zmiany. Poprzez jednakową reakcję powłoka dostosowuje się do zachodzących zmian w jednym czasie.
i.	Rozwiązanie stwarza poszczególnym elementom możliwości, sprzyjające powstawaniu nowych powiązań.		1			Poszczególne elementy rozwiązania (np. czujnik, panel sterujący, siłownik) współdziałają ze sobą, będąc od siebie zależnymi. Ponadto sama powłoka poprzez pełnione funkcje oddziałuje również na inne części budynku.
ii.	Rozwiązanie tworzy alternatywną przestrzeń dla rozwoju (np. nowe pomysły, nowe miejsca pracy).			0,5		Pomimo tego, że elewacje kinetyczne, pozwalające na adaptowanie budynków do zmiennych warunków są już przedmiotem badań a coraz częściej i wdrożeń, projektowane rozwiązanie może tworzyć nowe możliwości projektowe.
<b>OGÓŁEM:</b>		<b>91,7%</b>	<b>5,5</b>			
<b>Adaptowanie się do zmiennych warunków:</b>		<b>8</b>				
4.1.	Rozwiązanie dostosowuje się do nagłych zmian czasowych i przestrzennych.		1			Systemy mechaniczne przekształcają powłokę, dostosowując ją do panujących w danym momencie warunków. Ponadto rozwiązanie jest proste do zdemontowania, stąd może być dopasowane do nowych warunków przestrzennych.

	a.	Działanie rozwiązania zakłada wymianę: energii, informacji i materii. Obserwacja tego procesu służy ulepszeniu systemu.	1			Obecne w rozwiązaniu czujniki mierzą temperaturę oraz ilość promieniowania docierającego do przegrody. Zbierane dane służą do ulepszania działania systemu poprzez wywoływanie natychmiastowych reakcji.
	b.	Rozwiązanie odporne jest na nieoczekiwane pojawiające się problemy, przy jednoczesnym utrzymaniu ruchu (działania).	1			Z uwagi na występowanie w obrębie elewacji wielu indywidualnie sterowanych modułów, awaria jednego z nich nie zaburza działania całego systemu.
	i.	Działanie utrzymywane jest dzięki stosowaniu różnych rozwiązań dla funkcji krytycznych.		0,5		Regulacja temperatury przegrody możliwa jest dzięki sezonowym zmianom kształtu i grubości powłoki zewnętrznej oraz obecności bufora cieplnego lub szczeliny wentylacyjnej. Jednak działania aktywowane są wyłącznie przez ruch siłowników.
	ii.	Funkcja utrzymana jest przez powielanie elementów krytycznych.	1			Każdy moduł posiada własną parę siłowników, która porusza nim w zależności od warunków panujących na zewnątrz.
	iii.	Elementy pełniące poszczególne funkcje są rozproszone i zdecentralizowane.	1			Panele sterujące i czujniki są rozmieszczone w różnych częściach powłoki budynku, co stanowi zabezpieczenie przed zatrzymaniem systemu w razie awarii jednego z nich.
	c.	Rozwiązanie tworzy wiele form, procesów i systemów, by zapewnić jego funkcjonalność przy zmianach czasowych i przestrzennych.			0	Rozwiązanie opiera się wyłącznie na jednym rodzaju modułu, który jest powielany, tworząc powłokę budynku.
	d.	Rozwiązanie dostosowuje się do danych warunków wraz z innymi częściami systemu, aby zwiększyć poziom adaptacji.	1			Rozwiązanie, dzięki zmianom kształtu powłoki zewnętrznej oraz okresowej obecności bufora cieplnego albo szczeliny wentylacyjnej reguluje ilość energii cieplnej pochłanianej i uwalnianej przez budynek.
		<b>OGÓŁEM:</b>	<b>81,3%</b>	<b>6,5</b>		
		<b>Dostosowanie do lokalnych warunków i reagowanie na nie:</b>	<b>14</b>			
5.1.		Rozwiązanie wpasowuje się i integruje się z systemem, dlatego też traktowane jest jako jego element a nie pojedyncza jednostka.	1			Rozwiązanie stanowi element budynku montowany do ściany konstrukcyjnej i wpływa bezpośrednio na działanie przegrody. Zmiany kształtu powłoki oraz okresowa obecność bufora cieplnego albo szczeliny wentylacyjnej pomagają regulować temperaturę przegrody, wpływając na efektywność działania całego budynku.
	a.	Rozwiązanie wykorzystuje ograniczenia jako nowe możliwości do tworzenia innowacyjnych rozwiązań dostosowanych do kontekstu.		0,5		Rozwiązanie uwzględnia lokalne uwarunkowania - brak wody i duże nasłonecznienie. Założeniem jego działania jest jednak wykorzystanie systemów mechanicznych, które choć są zasilane energią słoneczną, to wciąż wymagają jej sporego zużycia.
	i.	Materiały użyte w rozwiązaniu są lokalne i dostępne w dużych ilościach.			0	Wykorzystywane materiały (stal, aluminium, tkaniny techniczne) nie są dostępne lokalnie. Muszą być sprowadzane z zewnątrz, co często wymaga pokonywania dużych odległości, głównie przy użyciu transportu lądowego i morskiego.
	ii.	Rozwiązanie przechwytuje, magazynuje lub wykorzystuje swobodnie dostępną energię.	1			Wszystkie wykorzystywane systemy mechaniczne zasilane są energią słoneczną, produkowaną przez panele fotowoltaiczne montowane w obrębie budynku.
	b.	Rozwiązanie wspiera współdziałanie oraz tworzenie obustronnie korzystnych relacji z systemem.	1			Rozwiązanie oparte jest na niezależnych modułach, które współdziałają ze sobą. Projektowany system współgra też z pozostałymi elementami budynku np. wykorzystuje ściany jako konstrukcję nośną i watswę akumulacyjną, zapewniając jej ochronę przed czynnikami zewnętrznymi.
	i.	Rozwiązanie tworzy nowy obszar badań, a nie jest kolejną iteracją istniejących już systemów.		0,5		Rozwiązanie stanowi nową propozycję wobec istniejących systemów kinetycznych powłok budynków, które są obecnie coraz częściej wdrażane w architekturze.
	ii.	Rozwiązanie stanowi część systemu, umożliwiając elementom systemu korzystne wpływanie na siebie nawzajem.	1			Rozwiązanie stanowi zintegrowaną z budynkiem powłokę zewnętrzną, która wraz z innymi elementami budynku poprawia jego efektywność energetyczną i funkcjonalność.
	iii.	Rozwiązanie wzmacnia powiązania w ramach systemu i poza nim poprzez wzajemne oddziaływania.	1			Rozwiązanie chroni budynek i jego elementy przed czynnikami zewnętrznymi, głównie wahaniami temperatur oraz promieniowaniem, ograniczając potrzebę korzystania z systemów klimatyzacyjnych. Wpływa na poprawę komfortu odczuwalnego przez użytkowników oraz redukcję kosztów utrzymania budynku.
	iv.	Rozwiązanie rozwija się wraz z innymi częściami systemu.		0,5		Rozwiązanie charakteryzują różne tryby działania, które przyjmuje w zależności od panujących warunków i potrzeb użytkowników, jednak póki co jest ono oparte na wyłącznie jednym module, który nie zastąpi lub nie poprawi działania przegród szklanych lub dużych przeszkleń budynków.
	c.	Rozwiązanie wykorzystuje istniejące cykle (np. pogodowe, dobowe, sezonowe, kulturowe).	1			Działanie rozwiązania jest zależne zarówno od dobowych, jak też okresowych zmian temperatury i nasłonecznienia, do których się ono dostosowuje.
	d.	Rozwiązanie szybko wykrywa sygnały (informacje zwrotne) aby wywoływać reakcje.	1			Umieszczone w przegrodzie czujniki i sterowniki wysyłają sygnały, których zadaniem jest sterowanie siłownikami.
	i.	Rozwiązanie szybko i odpowiednio reaguje na otrzymywane informacje zwrotne.	1			Siłowniki są natychmiastowo uruchamiane lub zatrzymywane po otrzymaniu odpowiednich sygnałów ze sterowników.
	ii.	Rozwiązanie wykorzystuje metodę nauki poprzez naśladowanie, próby i błędy (np. AI). Gromadzi wiedzę, która pozwala ulepszać jego działanie.		0,5		Założeniem projektu jest monitorowanie i testowanie jego efektywności oraz optymalizowanie jego cyklu życiowego a w efekcie jego dalsze rozwijanie i tworzenie alternatywnych rozwiązań.

	iii.	Rozwiązanie przekazuje sygnały, odbiera je i odpowiednio reaguje, sprawiając, że wszystkie trzy elementy tworzą działający ciąg przyczynowo-skutkowy.	1			W rozwiązaniu sygnały wysyłane przez dopasowane do systemu czujniki i sterowniki, są odbierane przez odpowiednie siłowniki, wywołując ich reakcję, czyli ruch powłoki w określonym kierunku.
		<b>OGÓŁEM:</b>	<b>78,6%</b>	<b>11</b>		
		<b>Używanie przyjaznej życiu chemii:</b>	<b>6</b>			
6.1.		Elementy rozwiązania w całym cyklu życia wykorzystują chemię, która nie wywiera negatywnego wpływu na naturalne procesy życiowe.		0,5		Choć stosowane w rozwiązaniu materiały podlegają recyklingowi lub nadają się do ponownego wykorzystania, to ich początkowa produkcja oraz procesy związane z przetwarzaniem wywierają negatywny wpływ na środowisko.
	a.	Rozwiązanie tworzy ograniczoną liczbę elementów, które są w odpowiedni i innowacyjny sposób łączone, aby właściwie działać.	1			Rozwiązanie składa się z kilku elementów, które łączone są ze sobą w prosty sposób tworzą pojedyncze moduły fasady kinetycznej, dostosowującej swój kształt adekwatnie do zmian zachodzących w otoczeniu.
	i.	Rozwiązanie wykorzystuje powszechne i bezpieczne elementy, które są składane w nowy sposób. Nie wymaga tworzenia nowych, potencjalnie toksycznych materiałów.	1			Rozwiązanie oparte jest na istniejących, przebadanych materiałach i technologiach, które poddawane są ciągłej optymalizacji.
	b.	Rozkład rozwiązania skutkuje wyłącznie produktami ubocznymi, które nie powodują żadnych szkód.		0,5		Choć wszystkie elementy rozwiązania mogą być odzyskane, to same procesy związane z rozpadem poszczególnych elementów mogą wywierać negatywny wpływ na środowisko.
	c.	Wszystkie procesy, towarzyszące tworzeniu i działaniu rozwiązania wykorzystują wodę jako rozpuszczalnik.			0	Stosowane tkaniny techniczne wymagają powlekania dodatkowymi warstwami syntetycznymi.
	i.	Reakcje chemiczne w cyklu życia rozwiązania zachodzą bez udziału katalizatorów i prowadzą do samoorganizacji systemu.			0	Procesy związane z produkcją i przetwarzaniem stosowanych materiałów wymagają wkładu energii mechanicznej i elektrycznej do stworzenia ich ostatecznej formy. Również działanie systemu oparte jest na zasilaniu elektrycznym.
		<b>OGÓŁEM:</b>	<b>50,0%</b>	<b>3</b>		
		<b>Oszczędne i wydajne wykorzystywanie materiałów i energii:</b>	<b>12</b>			
7.1.		Wszystkie wykorzystywane zasoby i możliwości są używane umiejętnie i oszczędnie.		0,5		Choć rozwiązanie zasilane jest energią słoneczną, to ilość energii potrzebna do działania całego systemu jest stosunkowo duża. Stosowane materiały mogą natomiast pochodzić z obiegu zamkniętego - recyklingu lub ponownego użycia.
	a.	Rozwiązanie uwzględnia lokalne uwarunkowania - możliwości i ograniczenia.		0,5		Choć rozwiązanie jako źródło energii wykorzystuje dostępną przez cały rok energię słoneczną, to materiały, z których jest zbudowane, zwykle nie są lokalne i muszą być transportowane na znaczne odległości.
7.2.		Rozwiązanie spełnia potrzeby funkcjonalne przy minimalnym nakładzie materiałów i energii w trakcie całego cyklu życia.		0,5		Pomimo tego, że rozwiązanie optymalizuje zużycie stosowanych materiałów potrzebnych do pełnienia przez nie określonej funkcji, to nakład energii potrzebny do utrzymania działania systemu jest relatywnie duży.
	a.	Rozwiązanie pełni więcej niż jedną funkcję.	1			Rozwiązanie chroni przegrodę przed czynnikami zewnętrznymi oraz wspomaga regulację jej temperatury.
	b.	Rozwiązanie opiera się na łatwości montażu i prostych procesach produkcyjnych o minimalnym zużyciu energii.		0,5		Rozwiązanie składa się z prostych do montażu i demontażu elementów, które bez problemu mogą zostać poddane naprawie lub wymianie. Część procesów produkcyjnych materiałów np. stali wymaga jednak użycia dużej ilości energii, potrzebnej również do późniejszego transportu.
	i.	Przyjęte strategie zmniejszają poziom temperatury, ciśnienia lub czas reakcji wymagane do działania procesów.	1			Stosowane czujniki i sterowniki pozwalają zautomatyzować pracę systemu a tym samym zredukować czas, energię i koszty, związane z manualnym sterowaniem systemu.
	c.	Stosowane w rozwiązaniu elementy i materiały pochodzą z ponownego użycia lub recyklingu.	1			Wszystkie materiały stosowane w rozwiązaniu pochodzą z recyklingu lub są ponownie zastosowane.
	i.	Materiały nadają się do recyklingu lub kompostowania.	1			Wszystkie stosowane materiały nadają się do recyklingu.
	ii.	Poszczególne elementy nadają się do demontażu, przekształcenia lub ponownego użycia.	1			Cały system, składający się z osobnych części, które są ze sobą łączone jest łatwo demontowalny, w związku z tym poszczególne elementy mogą być ponownie użyte.
	d.	Rozwiązanie wykorzystuje kształt i informacje w celu ograniczenia zużycia materiałów i energii.	1			Stosowane formy pozwalają optymalizować ilość wykorzystywanych materiałów oraz redukować ilość energii zużywanej przez budynek.
	i.	Forma rozwiązania służy pełnionej przez nie funkcji.	1			Forma jaką przybiera rozwiązanie służy pełnionej przez nie funkcji - kształty jakie przyjmuje powłoka pozwalają na optymalizowanie zysków energii z promieniowania w przeciągu roku.
	ii.	Rozwiązanie wykorzystuje ograniczenia jako okazję do rozwoju innowacji.		0,5		Rozwiązanie jest tworzone z myślą o niewielkich zasobach wody w regionach pustynnych. Jego wadą są jednak wyższe koszty związane z wykonaniem i użytkowaniem w porównaniu do konwencjonalnych izolacji wykonywanych w systemie mokrym.
		<b>OGÓŁEM:</b>	<b>79,2%</b>	<b>9,5</b>		

## **ZAŁĄCZNIK Nr 3**

### **Tabela nr 3**

#### **Ocena rozwiązania uszczegółowionego nr III**

Komory powietrzne pokryte paskami z termobimetalu

**Typ systemu:** pasywny

**Krótką charakterystyka:** system składający się z pojedynczych, prostokątnych, frezowanych komór powietrznych, które stanowią moduły montowane do elewacji. Do każdej komory przymocowane są paski z izolatora połączone z paskami z termobimetali, które reagują na zmiany temperatury otoczenia. Dzięki temu cały system pozwala regulować temperaturę przegrody, jak też chroni ją przed nadmiernym promieniowaniem słonecznym.

ZASADY ŻYCIA (KATEGORIE I KRYTERIA)			PUNKTACJA			ROZWIĄZANIE III. <i>Komory powietrzne pokryte paskami z termobimetalu</i>
	OCENA ŁĄCZNA:	88,9%	48	/	54	UZASADNIENIE OCENY
<b>Tworzenie warunków sprzyjających rozwojowi życia:</b>		<b>3</b>				
1.1.	Elementy i aspekty rozwiązania są zoptymalizowane, a nie zmaksymalizowane.		1			Rozwiązanie reguluje temperaturę przegrody, poprawia komfort termiczny a tym samym odpowiada na potrzeby użytkowników przy niewielkich kosztach utrzymania oraz optymalnym nakładzie energii rozważanym w całym cyklu życiowym.
1.2.	Rozwiązanie jest kompatybilne z innymi komponentami systemu w sposób korzystny dla ekosystemu.		1			Komory pokryte paskami z termobimetalu tworzą warstwę izolacyjną, która poprawia efektywność przegród w przeciągu całego roku. Wpływa to na poprawę komfortu termicznego wewnątrz budynków oraz umożliwia redukcję kosztów i zużycia energii.
1.3.	Rozwiązanie przyczynia się do wydłużenia cyklu życiowego systemu.		1			Rozwiązanie chroni elementy budynku przed działaniem czynników zewnętrznych, tym samym przedłużając ich trwałość. Części składowe rozwiązania mogą być wykorzystane ponownie.
<b>OGÓŁEM:</b>		<b>100,0%</b>	<b>3</b>			
<b>Ewolucja w celu przetrwania:</b>		<b>5</b>				
2.1.	Sukces przyjętej strategii zależy od tego, czy przyczynia się ona do funkcjonowania danego rozwiązania w długim okresie czasu.		1			Rozwiązanie dzięki pasywnemu regulowaniu temperatury przegród ogranicza potrzebę korzystania z urządzeń klimatyzacyjnych przy jednoczesnej redukcji kosztów i zużycia energii.
a.	Stosowane materiały, systemy i technologie są oparte o sprawdzone, działające rozwiązania z perspektywy środowiskowej, społecznej i finansowej.		1			Rozwiązanie oparte jest o termobimetały, które są powszechnie stosowane w różnych dziedzinach. Wykorzystuje ono także pasywne metody chłodzenia, które stosowane były w architekturze tradycyjnej regionów pustynnych. Strategie te pozwalają zredukować koszty oraz energię potrzebną do podtrzymania działania systemu.
b.	Innowacje są tworzone poprzez wzajemną wymianę informacji oraz integrowanie interdyscyplinarnych osiągnięć.		1			Rozwiązanie wykorzystuje przebadane materiały i technologie, wykorzystywane w różnych dziedzinach. Jest ono wynikiem integrowania wniosków wyciągniętych z analiz istniejących projektów.
i.	Innowacje tworzone są poprzez syntetyzowanie nowych osiągnięć / danych ze źródeł zewnętrznych.		1			Rozwiązanie jest efektem analiz zasad działania rozwiązań pasywnych oraz projektów Doris Kim Sung i jej zespołu.
ii.	Błędy są wykorzystywane jako narzędzie do wyciągania wniosków, a w efekcie generowania nowych rozwiązań.		1			Wady tworzonych przez Doris Kim Sung projektów służą jako narzędzie do generowania nowych pomysłów.
<b>OGÓŁEM:</b>		<b>100,0%</b>	<b>5</b>			
<b>Integrowanie rozwoju ze wzrostem:</b>		<b>6</b>				
3.1.	Zarówno rozwój rozwiązania, jak i jego skala są zoptymalizowane.		1			Projektowane rozwiązanie składa się z systemu modułowych komór, które układane są obok siebie, tworząc powłokę przegrody. Powłoka ta wpływa na poprawę warunków termicznych w budynku.
a.	Komponenty są modułowe, dzięki czemu możliwa jest ich rozbudowa o dodatkowe elementy.		1			Niezależne modułowe komory o prostokątnym kształcie, które tworzą powłokę przegrody dają możliwość łatwej rozbudowy systemu o nowe elementy.
b.	Rozwiązanie jest tworzone z myślą o kształcie, aby optymalizować wykorzystanie materiału bez produkowania odpadów.		1			Prostokątny kształt perforowanych komór pokrytych paskami z termobimetalu oraz ich niewielki rozmiar sprawiają, że ich montaż oraz łączenie są łatwe, a ponadto nie powodują produkowania odpadów.
c.	Komponenty systemu samoorganizują się jednocześnie, aby przynieść korzyści całemu systemowi.		1			Niezależne paski z termobimetalu mocowane do komór samoistnie reagują na zmiany w otoczeniu. Ich jednakowa reakcja, zachodząca w jednym czasie pozwala dostosować powłokę do panujących warunków.
i.	Rozwiązanie stwarza poszczególnym elementom możliwości, sprzyjające powstawaniu nowych powiązań.		1			Poszczególne elementy rozwiązania (np. komora i paski z termobimetalu) współdziałają ze sobą, będąc od siebie zależnymi. Ponadto sama powłoka poprzez pełnione funkcje oddziałuje również na inne części budynku.
ii.	Rozwiązanie tworzy alternatywną przestrzeń dla rozwoju (np. nowe pomysły, nowe miejsca pracy).		1			Zastosowanie termobimetalu jako elementu powłoki budynku, pomagającego wpłynąć na poprawę jego efektywności energetycznej otwiera nowy obszar do prowadzenia badań.
<b>OGÓŁEM:</b>		<b>100,0%</b>	<b>6</b>			
<b>Adaptowanie się do zmiennych warunków:</b>		<b>8</b>				
4.1.	Rozwiązanie dostosowuje się do nagłych zmian czasowych i przestrzennych.		1			Wykorzystanie termobimetalu zapewnia, że system może dostosowywać się do nagłych zmian w temperaturze. Ponadto projektowane rozwiązanie jest proste do zdemontowania, stąd może być dopasowane do nowych warunków przestrzennych.
a.	Działanie rozwiązania zakłada wymianę: energii, informacji i materii. Obserwacja tego procesu służy ulepszeniu systemu.		1			Termobimetały reagują na ilość promieniowania i temperaturę, oddziałując na ich powierzchnię. Zmiana ich kształtu pod wpływem napływu informacji z bodźców zewnętrznych pozwala zwiększać efektywność działania systemu.



	<b>b.</b>	Rozwiązanie odporne jest na nieoczekiwane pojawiające się problemy, przy jednoczesnym utrzymaniu ruchu (działania).	1			Dzięki modułowemu rozwiązaniu jakiegokolwiek uszkodzenie komory lub pojedynczych pasków nie wpływa na funkcjonalność systemu.
	<b>i.</b>	Działanie utrzymywane jest dzięki stosowaniu różnych rozwiązań dla funkcji krytycznych.	1			Regulacja temperatury przegrody możliwa jest dzięki pasywnemu chłodzeniu lub nagrzewaniu gromadzonego wewnątrz komór powietrza, odbijaniu promieni słonecznych (powłoka komór) i pochłanianie promieniowania (paski z termobimetalami).
	<b>ii.</b>	Funkcja utrzymana jest przez powielanie elementów krytycznych.	1			Powłoka elewacji składa się z licznych modułów a każdy z nich wyposażony jest w komorę powietrza, powłokę odbijającą promieniowanie i paski z termobimetalami. Wszystkie elementy tworzą razem kompleksowy system.
	<b>iii.</b>	Elementy pełniące poszczególne funkcje są rozproszone i zdecentralizowane.	1			Poszczególne moduły równomiernie rozłożone na ścianach budynku stanowią niezależnie działające części systemu, które razem tworzą obudowę budynku.
	<b>c.</b>	Rozwiązanie tworzy wiele form, procesów i systemów, by zapewnić jego funkcjonalność przy zmianach czasowych i przestrzennych.		0,5		Choć pojedynczy moduł stanowi połączenie kilku elementów, pełniących różne funkcje, to jednak samo rozwiązanie opiera się wyłącznie na jego jednym rodzaju, który jest powielany, tworząc tym samym obudowę budynku.
	<b>d.</b>	Rozwiązanie dostosowuje się do danych warunków wraz z innymi częściami systemu, aby zwiększyć poziom adaptacji.	1			Zależna od okresu zmiana działania i ukształtowania powłoki pozwala kontrolować ilość magazynowanego ciepła, a tym samym ilość energii cieplnej oddziałującej na budynek.
		<b>OGÓŁEM:</b>	<b>93,8%</b>	<b>7,5</b>		
		<b>Dostosowanie do lokalnych warunków i reagowanie na nie:</b>	<b>14</b>			
<b>5.1.</b>		Rozwiązanie wpasowuje się i integruje się z systemem, dlatego też traktowane jest jako jego element a nie pojedyncza jednostka.	1			Rozwiązanie stanowi element budynku integrowany ze ścianą konstrukcyjną i wpływa bezpośrednio na efektywność przegrody. Zmiany trybów działania modułów pomagają regulować temperaturę przegrody, wpływając na pracę całego budynku.
	<b>a.</b>	Rozwiązanie wykorzystuje ograniczenia jako nowe możliwości do tworzenia innowacyjnych rozwiązań dostosowanych do kontekstu.	1			Termobimetały to materiał idealny do stosowania w klimacie gorącym i suchym, który charakteryzują niewielką ilość opadów, wysokie temperatury i duże nasłonecznienie.
	<b>i.</b>	Materiały użyte w rozwiązaniu są lokalne i dostępne w dużych ilościach.			0	Metale wykorzystywane do tworzenia termobimetalami, przeważnie zespolenie stali i inwaru (stopu żelaza i niklu z dodatkiem węgla i chromu), nie są materiałami lokalnie i powszechnie występującymi.
	<b>ii.</b>	Rozwiązanie przechwytuje, magazynuje lub wykorzystuje swobodnie dostępną energię.	1			Do działania termobimetalami wystarczy energia pochodząca ze zmian temperatury otoczenia, konwekcji lub promieniowania cieplnego. Uwalnianie ciepła gromadzonego w komorze płyty zachodzi wyłącznie w wyniku konwekcji.
	<b>b.</b>	Rozwiązanie wspiera współdziałanie oraz tworzenie obustronnie korzystnych relacji z systemem.	1			Rozwiązanie oparte jest na niezależnych modułach, które współdziałają ze sobą. Projektowany system współgra też z pozostałymi elementami budynku np. wykorzystuje ściany jako konstrukcję nośną i watswę akumulacyjną, zapewniając jej ochronę przed czynnikami zewnętrznymi.
	<b>i.</b>	Rozwiązanie tworzy nowy obszar badań, a nie jest kolejną iteracją istniejących już systemów.	1			Rozwiązanie jest jedną z niewielu istniejących propozycji powłok, która pozwala adaptować budynek do zmiennych warunków bez wkładu dodatkowej energii do zasilania systemu, tym samym tworzy nowy obszar badań.
	<b>ii.</b>	Rozwiązanie stanowi część systemu, umożliwiając elementom systemu korzystne wpływanie na siebie nawzajem.	1			Rozwiązanie stanowi zintegrowaną z budynkiem powłokę zewnętrzną, która wraz z innymi elementami budynku poprawia jego efektywność energetyczną i funkcjonalność.
	<b>iii.</b>	Rozwiązanie wzmacnia powiązania w ramach systemu i poza nim poprzez wzajemne oddziaływania.	1			Rozwiązanie chroni budynek i jego elementy przed czynnikami zewnętrznymi, głównie wahaniami temperatur oraz promieniowaniem, ograniczając potrzebę korzystania z systemów klimatyzacyjnych. Wpływa na poprawę komfortu odczuwalnego przez użytkowników oraz redukcję kosztów utrzymania budynku.
	<b>iv.</b>	Rozwiązanie rozwija się wraz z innymi częściami systemu.		0,5		Choć rozwiązanie charakteryzują różne tryby działania, które przyjmuje w zależności od panujących warunków i potrzeb użytkowników, to póki co jest ono oparte wyłącznie na jednym module, który nie zastąpi lub nie poprawi działania przegród szklanych/dużych przeszkleń budynków.
	<b>c.</b>	Rozwiązanie wykorzystuje istniejące cykle (np. pogodowe, dobowe, sezonowe, kulturowe).	1			Działanie rozwiązania jest zależne zarówno od dobowych, jak też okresowych zmian temperatury i nasłonecznienia, do których się ono dostosowuje. Ponadto w zależności od okresu wykorzystuje ono naturalną cyrkulację powietrza.
	<b>d.</b>	Rozwiązanie szybko wykrywa sygnały (informacje zwrotne) aby wywoływać reakcje.	1			Rozwiązanie jest czułe na naturalne zmiany, zachodzące w temperaturze i poziomie nasłonecznienia i reaguje na nie, wywołując naturalne procesy - jak konwekcyjna wymiana ciepła i cyrkulacja powietrza.
	<b>i.</b>	Rozwiązanie szybko i odpowiednio reaguje na otrzymywane informacje zwrotne.	1			Paski z termobimetalami natychmiastowo reagują na zmiany zachodzące w temperaturze/promieniowaniu słonecznym. Gdy paski odginają się w reakcji na zachodzące zmiany wewnątrz komór dochodzi do samoczynnej cyrkulacji powietrza.
	<b>ii.</b>	Rozwiązanie wykorzystuje metodę nauki poprzez naśladowanie, próby i błędy (np. AI). Gromadzi wiedzę, która pozwala ulepszać jego działanie.		0,5		Założeniem projektu jest monitorowanie i testowanie jego efektywności oraz optymalizowanie jego cyklu życiowego a w efekcie jego dalsze rozwijanie i tworzenie alternatywnych rozwiązań.
	<b>iii.</b>	Rozwiązanie przekazuje sygnały, odbiera je i odpowiednio reaguje, sprawiając, że wszystkie trzy elementy tworzą działający ciąg przyczynowo-skutkowy.	1			Zarówno sygnały wysyłane przez naturalnie zachodzące w otoczeniu zmiany (wzrost/spadek temperatury lub nasłonecznienia), stosowane materiały (termobimetały), jak i ich reakcje (odginanie/powrót do oryginalnego położenia) są do siebie dopasowane.

<b>OGÓŁEM:</b>		<b>85,7%</b>	<b>12</b>		
<b>Używanie przyjaznej życiu chemii:</b>		<b>6</b>			
<b>6.1.</b>	Elementy rozwiązania w całym cyklu życia wykorzystują chemię, która nie wywiera negatywnego wpływu na naturalne procesy życiowe.		0,5		Choć stosowane w rozwiązaniu materiały podlegają recyklingowi lub nadają się do ponownego wykorzystania, to ich początkowa produkcja oraz procesy związane z przetwarzaniem wywierają negatywny wpływ na środowisko.
<b>a.</b>	Rozwiązanie tworzy ograniczona liczba elementów, które są w odpowiedni i innowacyjny sposób łączone, aby właściwie działać.	1			Pojedynczy moduł składa się z kilku elementów (komory, pasków i elementów montażowych), które odpowiednio łączone ze sobą wspomagają regulację temperatury przegrody i chronią ją przed czynnikami zewnętrznymi.
<b>i.</b>	Rozwiązanie wykorzystuje powszechne i bezpieczne elementy, które są składane w nowy sposób. Nie wymaga tworzenia nowych, potencjalnie toksycznych materiałów.	1			Rozwiązanie oparte jest na istniejących, przebadanych materiałach i technologiach, które poddawane są ciągłej optymalizacji.
<b>b.</b>	Rozkład rozwiązania skutkuje wyłącznie produktami ubocznymi, które nie powodują żadnych szkód.		0,5		Choć wszystkie elementy rozwiązania mogą być odzyskane, to same procesy związane z rozpadem poszczególnych elementów mogą wywierać negatywny wpływ na środowisko.
<b>c.</b>	Wszystkie procesy, towarzyszące tworzeniu i działaniu rozwiązania wykorzystują wodę jako rozpuszczalnik.			0	Stosowane termo-bimetały są tworzone w wyniku lutowania lub zgrzewania, które wymagają dużego nakładu energii do topienia metalu, który dopiero wtedy łączy się ze sobą.
<b>i.</b>	Reakcje chemiczne w cyklu życia rozwiązania zachodzą bez udziału katalizatorów i prowadzą do samoorganizacji systemu.		0,5		Procesy związane z produkcją i przetwarzaniem stosowanych materiałów wymagają wkładu energii mechanicznej i elektrycznej. Samo działanie rozwiązania oparte jest jednak na autonomicznej, samoorganizującej się strukturze.
<b>OGÓŁEM:</b>		<b>58,3%</b>	<b>3,5</b>		
<b>Oszczędne i wydajne wykorzystywanie materiałów i energii:</b>		<b>12</b>			
<b>7.1.</b>	Wszystkie wykorzystywane zasoby i możliwości są używane umiejętnie i oszczędnie.	1			Działanie rozwiązania oparte jest wyłącznie na systemach pasywnych. Ponadto stosowane materiały mogą być wykorzystywane w obiegu zamkniętym poprzez ponowne wykorzystywanie, bądź recykling.
<b>a.</b>	Rozwiązanie uwzględnia lokalne uwarunkowania - możliwości i ograniczenia.		0,5		Choć rozwiązanie jako źródło energii wykorzystuje dostępną przez cały rok energię słoneczną, to materiały, z których jest zbudowane, zwykle nie są lokalne i muszą być transportowane na znaczne odległości.
<b>7.2.</b>	Rozwiązanie spełnia potrzeby funkcjonalne przy minimalnym nakładzie materiałów i energii w trakcie całego cyklu życia.	1			Rozwiązanie optymalizuje zarówno ilość używanych materiałów, które pochodzą z obiegu zamkniętego, jak też energię potrzebną do jego produkcji, konserwacji i demontażu.
<b>a.</b>	Rozwiązanie pełni więcej niż jedną funkcję.	1			Rozwiązanie chroni przegrodę przed czynnikami zewnętrznymi oraz wspomaga regulację jej temperatury.
<b>b.</b>	Rozwiązanie opiera się na łatwości montażu i prostych procesach produkcyjnych o minimalnym zużyciu energii.	1			Rozwiązanie składa się z prostych do montażu i demontażu elementów, które bez problemu mogą zostać poddane naprawie lub wymianie. Stosowane materiały nie wymagają zaś ogromnych nakładów energii do ich produkcji.
<b>i.</b>	Przyjęte strategie zmniejszają poziom temperatury, ciśnienia lub czas reakcji wymagane do działania procesów.	1			Z uwagi na to, że termobimetały samoistnie reagują na sygnały odbierane z otoczenia, skrócony jest czas reakcji oraz zredukowane są koszty, materiały i energia potrzebne do zasilania przekaźników.
<b>c.</b>	Stosowane w rozwiązaniu elementy i materiały pochodzą z ponownego użycia lub recyklingu.	1			Wszystkie materiały stosowane w rozwiązaniu pochodzą z recyklingu lub są ponownie zastosowane.
<b>i.</b>	Materiały nadają się do recyklingu lub kompostowania.	1			Wszystkie stosowane materiały nadają się do recyklingu.
<b>ii.</b>	Poszczególne elementy nadają się do demontażu, przekształcenia lub ponownego użycia.	1			Cały system, składający się z osobnych części, które są ze sobą łączone jest łatwo demontowalny, w związku z tym poszczególne elementy mogą być ponownie użyte.
<b>d.</b>	Rozwiązanie wykorzystuje kształt i informacje w celu ograniczenia zużycia materiałów i energii.	1			Stosowane formy pozwalają optymalizować ilość wykorzystywanych materiałów oraz redukować ilość energii zużywanej przez budynek.
<b>i.</b>	Forma rozwiązania służy pełnionej przez nie funkcji.	1			Forma modułów służy pełnionej przez nie funkcji - ułożenie pasków pozwala na optymalizowanie zysków energii z promieniowania w przeciągu roku, a kształt komór wspomaga naturalną cyrkulację powietrza, gdy paski są odgięte.
<b>ii.</b>	Rozwiązanie wykorzystuje ograniczenia jako okazję do rozwoju innowacji.		0,5		Rozwiązanie jest tworzone z myślą o niewielkich zasobach wody w regionach pustynnych. Jego wadą są jednak wyższe koszty związane z wykonaniem i użytkowaniem w porównaniu do konwencjonalnych izolacji wykonywanych w systemie mokrym.
<b>OGÓŁEM:</b>		<b>91,7%</b>	<b>11</b>		

## **ZAŁĄCZNIK Nr 4**

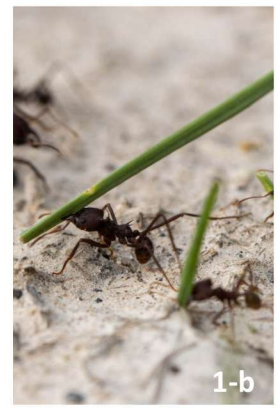
### **Plansze nr 4.1-4.7**

#### **Fauna**

Zestawienie fotografii 34 badanych organizmów żywych

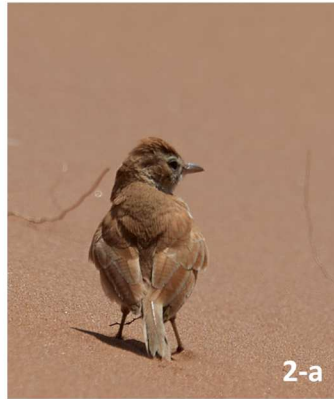
**01| Mrówka**  
(*Atta vollenweideri*)

1-a – gniazdo mrówek z powierzchniowymi "stożkami" wspomagającymi przewietrzanie,  
© Santiago Mailhos  
1-b – mrówki niosące żdźbła traw, © Patricia Mancilla Iglesias



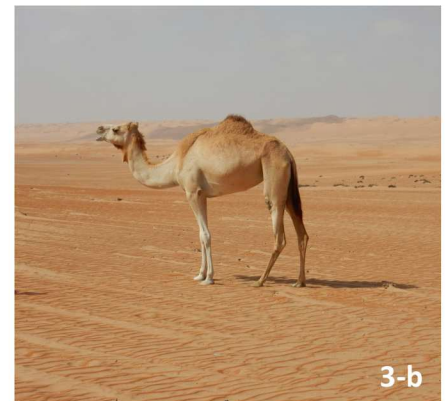
**02| Afroskowronek rudy**  
(*Calendulauda erythrochlamys*)

2-a – afroskowronek rudy,  
© Torsten Dikov  
2-b – chłodzenie przez parowanie (ziajanie),  
© Ryne Rutherford



**03| Wielbłąd jednogarbny**  
(*Camelus dromedarius*)

3-a – rasa o ciemnym umaszczeniu, © Gonzalo Mucientes Sandoval  
3-b – rasa o jasnej barwie sierści, © Petra Caltová



**04| Wilk arabski**  
(*Canis lupus arabs*)

4-a – chłodzenie przez dyszenie, © Alex Alaman  
4-b – duże uszy wilka, © Shachar Alterma



**05| Saharyjska srebrna mrówka**  
(*Cataglyphis bombycina*)

5-a – grupa mrówek,  
© Philipp Hoenle  
5-b – ciało mrówki pokryte srebrnymi włoskami o pryzmatycznym kształcie,  
© Philipp Hoenle





6-a



6-b

**06| Biały żuk**  
(*Cyphochilus*)

6-a – *Cyphochilus insulanus*,  
© Chen Creek  
6-b – *Cyphochilus rohingyae*,  
© DH Fischer



7-a



7-b

**07| Mulgara przęgoonowa**  
(*Dasyercus cristicauda*)

7-a – mulgara,  
© Matt Brun  
7-b – mulgara w ruchu,  
© Yingyod Lapwong



8-a



8-b

**08| Szczuroskoczek zmienny**  
(*Dipodomys merriami*)

8-a, b – szczuroskoczek,  
© Isaac Capp



9-a



9-b

**09| Legwan pustynny**  
(*Disposaurus dorsalis*)

9-a – chłodzenie poprzez ziajanie, © Gary Nafis  
9-b – pozycjonowanie ciała,  
© Wikimedia.org



10-a



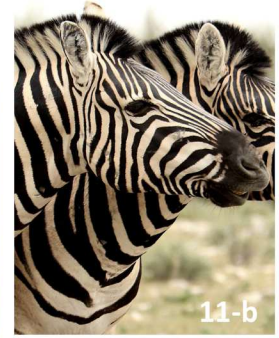
10-b

**10| Emu**  
(*Dromaius novaehollandiae*)

10-a – emu, © David Wesolowski  
10-b – podwójne pióro emu,  
© David Sando

**11| Zebra stepowa**  
(*Equus quagga*)

11-a – stado zebra,  
© Bart Wursten  
11-b – pasiaste głowy,  
© Bart Wursten



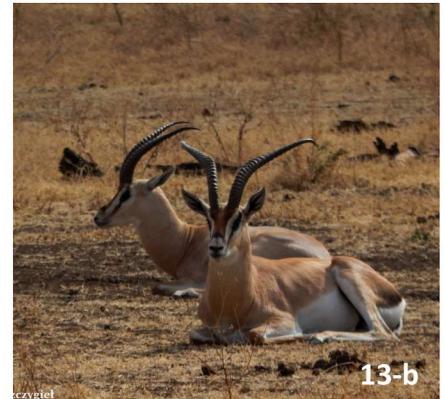
**12| Kot pustylny**  
(*Felis margarita*)

12-a – duże uszy kota,  
© Carlos N. G. Bocos  
12-b – kot w trakcie polowania,  
© © Alain Dragesco-Joffe



**13| Gazelka masajska**  
(*Gazella granti*)

13-a – samiec gazelki,  
© Wilf Podolak  
13-b – gazelki w spoczynku,  
© Hubert Szczygieł



**14| Gazela Thomsona**  
(*Gazella thomsoni*)

14-a – samiec gazeli,  
© Markus Lije  
14-b – młode gazele,  
© Jane Dixon



**15| Afrowiórka namibijska**  
(*Geosciurus inauris*)

15-a – ogon wykorzystywany jako parasol,  
© Alena Dehm  
15-b – biały od spodu ogon,  
© Andre Harmse





**16| Termyty**  
(*Isoptera, Nasutitermes triodiae*)

16-a – termyty w jednym z tuneli, © David Rankin  
16-b – gniazda termitów, © Mike Hooper



**17| Zając wielkouchy**  
(*Lepus californicus*)

17-a – silnie ukrwione uszy zająca, © Greg Shchepanek  
17-b – zając ukryty w cieniu, © Ernesto Solana



**18| Zając płowy**  
(*Lepus capensis*)

18-a – zając o dużych uszach kryjący się w cieniu, © Shachar Alterman



**19| Słoń afrykański**  
(*Loxodonta africana*)

19-a – wilgoć zatrzymywana między fałdami na skórze słoni, © Davide Diana



**20| Kangur rudy**  
(*Macropus rufus*)

20-a – matka z młodym ukryci w cieniu, © Diana Davey  
20-b – kangur rudy, © Logan AW. Lalonde

**21| Oryks południowy**  
(*Oryx leucoryx*)

21-a – oryks odpoczywający w rozkopanym zagłębieniu,  
© Amaël Borzée  
21-b – grupa oryksów,  
© Abdulla Hamad Aldhaheri



21-a



21-b

**22| Susłouch skalny**  
(*Otospermophilus variegatus*)

22-a – struktura i optyka sierści gryzonia umożliwiające regulację ilości pochłanianego promieniowania,  
© Jacob Saucier



22-a

**23| Awassi (owca)**  
(*Ovis aries*)

23-a – runo owcy składające się z trzech frakcji włosa,  
© Alamy  
23-b – owce chowające głowy pod brzuchami pozostałych członków stada, © Alamy



23-a



23-b

**24| Merynos (owca)**  
(*Ovis aries*)

24-a – jednakowa długość włosa w runie, © Alamy  
24-b – stado owiec, © Alamy



24-a



24-b

**25| Piaskojeż etiopski**  
(*Paraechinus aethiopicus*)

25-a – jeż, © P. Faucher  
25-b – jeż aktywny nocą,  
© Jonathan Ben Simon

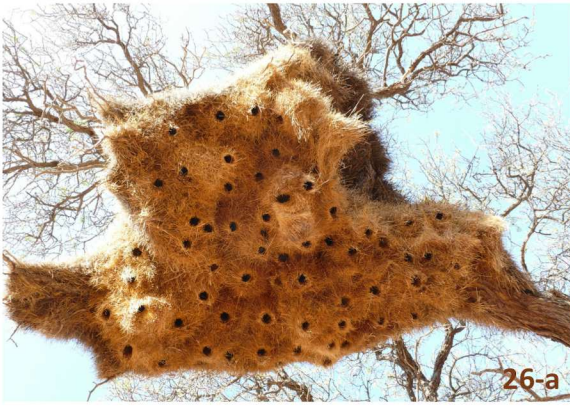


25-a



25-b





26-a



26-b

**26| Tkacz**  
(*Philetairus socius*)

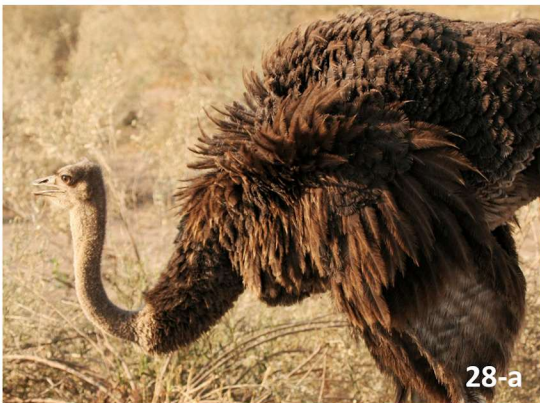
26-a – widziane od dołu wejścia do komór w gnieździe tkaczy, © Bernhard Fischer  
26-b – tkacze, © Peter Kelly



27-a

**27| Stepówka piaskowa**  
(*Pterocles coronatus*)

27-a – stepówka chłodząca organizm przez rozszerzanie worka gardłowego, © Sami Ullah Majeed



28-a



28-b

**28| Struś czerwonoskóry**  
(*Struthio camelus*)

28-a – samica chłodząca organizm przez rozkładanie skrzydeł na boki i unoszenie piór grzbietowych, © Don-Jean Leandri-Breton  
28-b – samiec w pozycji normalnej, © Emerson Harman



29-a



29-b

**29| Gekon murowy**  
(*Tarentola mauritanica*)

29-a – ciemna skóra gekona za dnia, © Leonardo Fritz  
29-b – blade ciało jaszczurki po nocy, © Javis Hun



30-a



30-b

**30| Jaszczurka zwinka Mojave**  
(*Uma scoparia*)

30-a – jaszczurka wygrzewająca się na słońcu, © Tom Benson  
30-b – jaszczurka zakopana pod piaskiem, © Larry Holleman

**31| Legwan**  
(*Urosaurus ornatus*)

31-a – brązowa skóra legwana, © Rebecca Pry  
31-b – reorganizacja niebieskich komórek pigmentowych powoduje zmianę barwy skóry gada, © Jorge H. Valdez



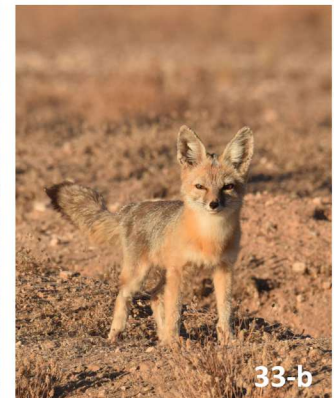
**32| Uta plamoboka**  
(*Uta stansburiana*)

32-a – uta wygrzewająca się na słońcu, © Andy Birkey  
32-b – uta chowająca się do cienia, © Jeff Tanner



**33| Lis długouchy**  
(*Vulpes macrotis*)

33-a – młode lisy wychodzące z nory, © Kerry Ross  
33-b – dorosły osobnik, © Ryan O'Donnell



**34| Fenek pustynny**  
(*Vulpes zerda*)

34-a – długie uszy fenka, © Marc Faucher



**ZAŁĄCZNIK Nr 5**

**Plansze nr 5.1-5.6**

**Flora**

Zestawienie fotografii 29 badanych organizmów żywych

**01| Baobab afrykański**  
(*Adansonia digitata*)

1-a – drzewo z baldachimem z liści, © Claudia Komesau  
1-b – liście baobabu, © randomharvest.co.za



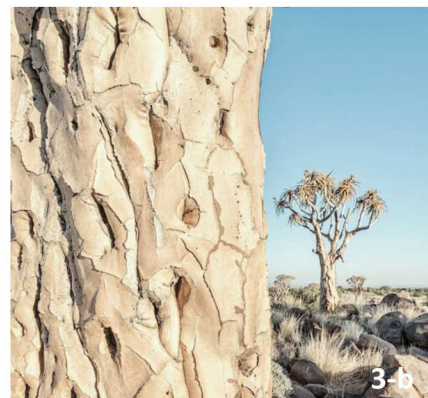
**02| Agawa stuletnia**  
(*Agave americana*)

2-a – mięsiste liście agawy, © Ron Vanderhoff  
2-b – agawa stuletnia, © agaveville.org



**03| Drzewo kołczanowe**  
(*Aloidendron dichotomum*)

3-a – drzewo kołczanowe, © Djego Delso  
3-b – żółta kora drzewa, © Paul Hetzel



**04| Sagebrush**  
(*Artemisia tridentata*)

4-a – drobne liście krzewu pokryte srebrnymi włoskami, © Matt Lavin  
4-b – sagebrush, © Tim Messick



**05| Łoboda**  
(*Atriplex polycarpa*)

5-a – łoboda, © Becky Escalante  
5-b – liście i łodyga krzewu pokryte kryształkami soli, © Steve Matson





**06 | Nolina wygięta**  
(*Beaucarnea recurvata*)

6-a – pękaty pień drzewa magazynujący wodę,  
© Horacio V. Barcenas  
6-b – drzewo z widocznym pióropuszem liści, © POWO



**07 | Karnegia olbrzymia**  
(*Carnegiea gigantea*)

7-a – kaktus zwany Saguaro,  
© Karl Magnuson  
7-b – łodyga i kolce karnegii,  
© alamy.com



**08 | Prusznik**  
(*Ceanothus crassifolius*)

8-a – krzew prusznika,  
© Millie Basden  
8-b – uniesione liście w trakcie pory suchej,  
© Ron Vanderhoff  
8-c – liście opuszczone,  
© Julia Markey



**09 | Starzec**  
(*Cephalocereus senilis*)

9-a – cylindryczne łodygi kaktusa, © P Gonzalez Zamora  
9-b – długie, siwe ciernie kaktusa, © Ma. Eugenia Mendiola González



**10 | Grubosz owalny**  
(*Crassula ovata*)

10-a – grubosz z mięsistymi, zielonymi liśćmi, © Luke Nel  
10-b – liście grubosza zmieniające kolor pod wpływem pigmentów,  
© Jim Smith

**11| Cylindropuncja**  
(*Cylindropuntia bigelovii*)

11-a – gałęzie opuncji gęsto pokryte kolcami,  
© Michael Kielb  
11-b – opuncja z licznymi bocznymi gałęziami,  
© Berna Gerard



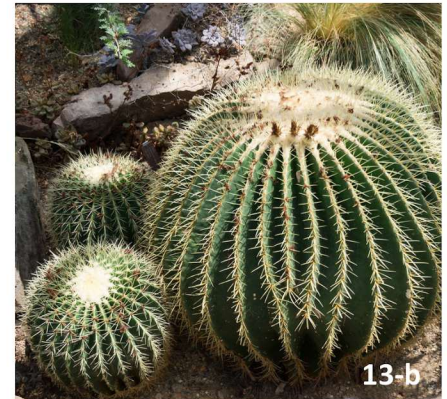
**12| Pochrzyn słoniowy**  
(*Dioscorea elephantipes*)

12-a – młody pochrzyn,  
© Alex Lansdowne  
12-b – roślina z nadziemnym pnączem o drobnych liściach,  
© Thabo Maphisa



**13| Złota becza**  
(*Echinocactus grusonii*)

13-a – kaktus, © Ruth Julieta Chávez Martínez  
13-b – grupa kaktusów,  
© oneearth.org



**14| Kaktus tęczy**  
(*Echinocereus rigidissimus*)

14-a – kaktus tęczy,  
© Mike Ostrowski  
14-b – układ kolców kaktusa,  
© Chris McCreedy



**15| Brittle bush**  
(*Encelia farinosa*)

15-a – kwitnący krzew,  
© Fred Melgert  
15-b – liście pokryte drobnymi włoskami,  
© William Terry Hunefeld





16-a



16-b

**16| Wilczomlec**  
(*Euphorbia abyssinica*)

16-a – dojrzały wilczomlec,  
© Antonín Horáček  
16-b – żebrowe łodygi  
odchodzące od głównego  
pnia, © Antonín Horáček



17-a



17-b

**17| Feroakaktus**  
(*Ferocactus wislizeni*)

17-a – rosnący pod kątem  
feroakaktus, © CK Kelly  
17-b – układ kolców kaktusa,  
© Robin Gwen Agarwal



18-a



18-b

**18| Boojum**  
(*Fouquieria columnaris*)

18-a – cienkie cierniste  
rozgałęzienia pokryte liśćmi,  
© Joachim Keller  
18-b – boojum pokryte liśćmi,  
© Joachim Keller



19-a



19-b

**19| Okotijo**  
(*Fouquieria splendens*)

19-a – okotijo,  
© Catherine Blanch  
19-b – drobne liście okotijo,  
© Gabi McLean



20-a

**20| Szarotka alpejska**  
(*Leontopodium nivale*)

20-a – łodygi i liście szarotki  
pokryte martwymi włoskami,  
© François-Xavier Taxil

**21| Wachlarzownica**  
(*Licuala ramsayi*)

21-a – liście wachlarzownicy,  
© Michael Cincotta  
21-b – wachlarzownica,  
© Aaron Bean



**22| Drzewo żelazne**  
(*Olneya tesota*)

22-a – liść drzewa pokryty włoskami, © Tim Giller  
22-b – kora drzewa żelaznego, © Don Rideout  
22-c – drzewo żelazne,  
© Fred Melgert, Carla Hoegen



**23| Palo verde**  
(*Parkinsonia florida*)

23-a – ang. Blue palo verde,  
© Fred Melgert, Carla Hoegen  
23-b – liście palo verde,  
© Tim Giller



**24| Palo verde**  
(*Parkinsonia microphylla*)

24-a – drobne liście drzewa,  
© Marianne Skov Jensen  
24-b – ang. Littleleaf palo verde,  
© CK Kelly



**25| Jadłoszyn**  
(*Prosopis velutina*)

25-a – jadłoszyn,  
© George Roark  
25-b – rozwijające się liście jadłoszynu pokryte włoskami,  
© Fred Melgert, Carla Hoegen







**26| Simondsja kalifornijska**  
(*Simmondsia chinensis*)

26-a – jojoba, © Jim Boone  
26-b – liście jojoby,  
© Len Mazur



**27| Kaktus organowy**  
(*Stenocereus thurberi*)

27-a – żebra i kolce kaktusa,  
© Christopher J. Earle  
27-b – dwa kaktusy organowe.  
© Christopher J. Earle



**28| Żółtak**  
(*Xanthorrhoea australis*)

28-a – odstąpięty rdzeń żółtaka,  
pióropusz z trawy osłaniający  
roślinę od góry, © Hugo Walton  
28-b – grupa żółtaków,  
© Nicholas Thoms



**29| Juka krótkolistna**  
(*Yuca brevifolia*)

29-a – juka krótkolistna,  
© Branden Kowalyszyn  
29-b – gałęzie juki,  
© Branden Kowalyszyn