Od projektu do recyklingu – brakujące ogniwo w modelowaniu tektury falistej

From design to recycling – the missing link in corrugated board modelling

TOMASZ GARBOWSKI, MACIEJ ROGALKA

DOI: 10.15199/54.2026.6.1

Modelowanie tektury falistej oraz opakowań z tego materiału koncentruje się najczęściej na etapie projektowania konstrukcji, ocenie parametrów wytrzymałościowych oraz doborze odpowiednich materiałów. W praktyce cykl życia opakowania obejmuje jednak znacznie szerszy zakres zjawisk: produkcję, magazynowanie, transport, użytkowanie, uszkodzenia eksploatacyjne oraz recykling włókien. Oznacza to, że decyzje projektowe podejmowane na początku procesu wpływają na koszty, trwałość i efektywność środowiskową także w dalszych etapach życia produktu. W artykule omówiono obecny stan modelowania tektury falistej oraz wskazano obszary, w których podejście to pozostaje niepełne. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi warunków logistycznych, zmian wilgotności, rzeczywistych scenariuszy użytkowania oraz jakości surowca wtórnego po recyklingu. Przedstawiono koncepcję zintegrowanego modelu cyklu życia opakowania, łączącego dane projektowe, produkcyjne, eksploatacyjne i środowiskowe. Wskazano, że rozwój takich narzędzi może wspierać bardziej racjonalne projektowanie, redukcję nadmiarowego materiału, ograniczenie strat transportowych oraz poprawę efektywności gospodarki obiegu zamkniętego. Przyszłość branży opakowaniowej może należeć do modeli, które analizują nie tylko moment produkcji pudełka, lecz całe jego życie aż do ponownego wykorzystania włókien.

Słowa kluczowe: *tektura falista, cykl życia opakowania, recykling, modelowanie, gospodarka obiegu zamkniętego, opakowania, projektowanie; zrównoważony rozwój*

The modelling of corrugated board and packaging structures is most often focused on the design stage, strength assessment, and material selection. In practice, however, the packaging life cycle involves a much broader range of phenomena, including production, storage, transport, use, operational damage, and fibre recycling. This means that design decisions made at the beginning of the process affect costs, durability, and environmental efficiency throughout later stages of product life. This paper discusses the current state of corrugated board modelling and identifies areas where the existing approach remains incomplete. Particular attention is given to the influence of logistical conditions, humidity changes, real-use scenarios, and the quality of recycled fibre after end-of-life processing. A concept of an integrated packaging life-cycle model combining design, production, operational, and environmental data is presented. It is shown that the development of such tools may support more rational design, reduction of excess material use, lower transport losses, and improved circular-economy efficiency. The future of the packaging industry may belong to models that analyse not only the moment a box is produced, but its entire life until the fibres are used again.

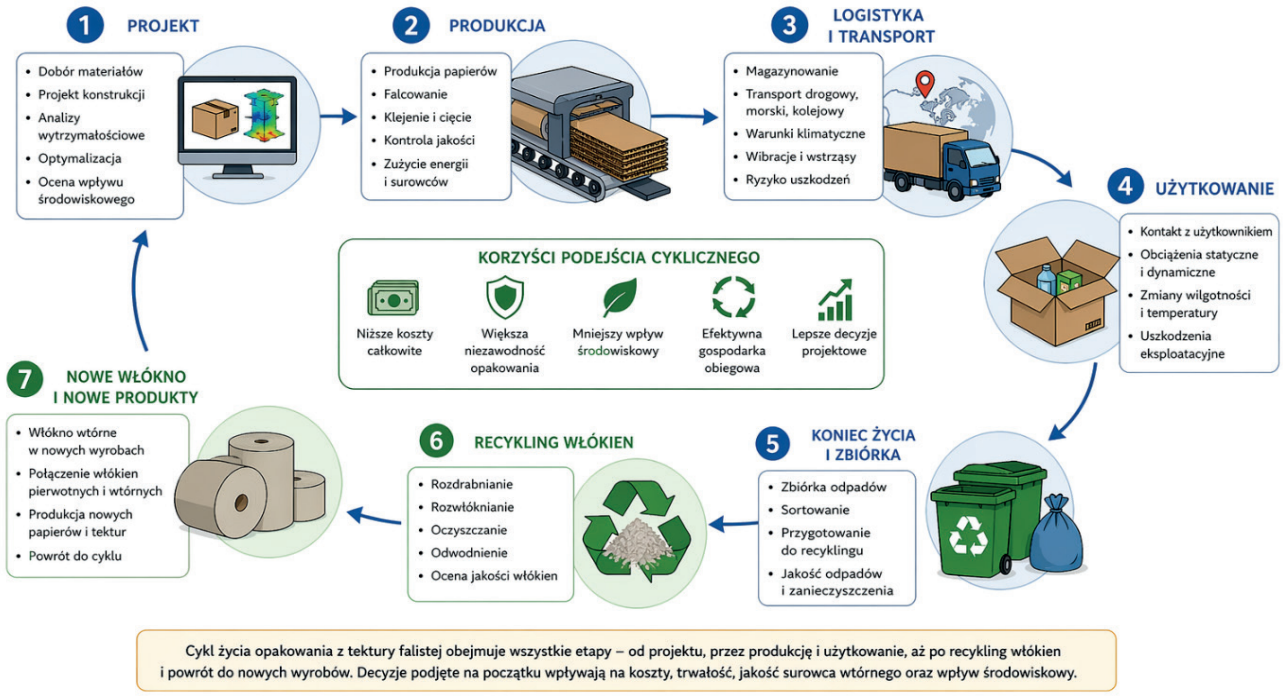
Keywords: *corrugated board, packaging life cycle, recycling, modeling, circular economy, packaging, design, sustainability*

Wprowadzenie

Tektura falista należy do najważniejszych materiałów opakowaniowych współczesnej gospodarki. Łączy niską masę, korzystny stosunek wytrzymałości do ciężaru, łatwość przetwarzania oraz wysoki potencjał recyklingu. Dzięki tym cechom stała się podstawowym materiałem transportowym i magazynowym dla wielu sektorów przemysłu, handlu oraz dynamicznie rozwijającego się rynku e-commerce. Każdego dnia miliony opakowań z tektury falistej uczestniczą w globalnym przepływie towarów.

Rozwój branży opakowaniowej doprowadził równocześnie do powstania zaawansowanych metod projektowania i oceny jakości. Powszechnie stosuje się badania ECT, BCT, testy laboratoryjne papierów składowych, metody numeryczne oraz narzędzia

Dr hab. inż. **T. Garbowski**, prof. UPP (tomasz.garbowski@up.poznan.pl), Uniwersyteckie Centrum Ekomateriałów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu; mgr inż. **M. Rogalka** (maciej.rogalka@student.put.poznan.pl), Instytut Mechaniki Stosowanej, Politechnika Poznańska



Rys. 1. Cykl życia opakowania z tektury falistej – od projektu po recykling

optymalizacji konstrukcji. W rezultacie wiele współczesnych opakowań projektowanych jest sprawniej i dokładniej niż kiedykolwiek wcześniej. Znaczenie klasycznych analiz wytrzymałości pudeł transportowych oraz zależności pomiędzy parametrami tektury a nośnością opakowań szeroko omówił Frank [6].

Jednocześnie większość tych analiz koncentruje się na początkowym etapie życia produktu, a więc na chwili produkcji oraz pierwszej ocenie parametrów użytkowych. Tymczasem rzeczywiste życie opakowania trwa znacznie dłużej. Obejmuje magazynowanie, transport, zmiany klimatyczne, uszkodzenia eksploatacyjne, kontakt z użytkownikiem końcowym, a następnie recykling włókien i ich powrót do kolejnych wyrobów papierniczych. Oznacza to, że decyzja projektowa podjęta dziś wpływa nie tylko na wytrzymałość pudełka jutro, lecz również na efektywność logistyki, liczbę reklamacji, ślad środowiskowy oraz jakość surowca wtórnego w przyszłości. Projektant opakowania oddziałuje więc na znacznie dłuższy łańcuch skutków, niż sugeruje sam rysunek konstrukcyjny.

W dobie gospodarki obiegu zamkniętego, rosnących cen surowców, wymagań ESG oraz cyfryzacji przemysłu coraz wyraźniej widać potrzebę nowego podejścia. Branża potrzebuje modeli obejmujących nie tylko nośność pudełka, ale pełny cykl życia opakowania, od projektu po recykling. Ujęcie opakowania jako obiektu funkcjonującego w pełnym cyklu życia przedstawiono schematycznie na rysunku 1.

Celem niniejszego artykułu jest wskazanie brakującego ogniwa w obecnym modelowaniu tektury falistej oraz przedstawienie kierunku rozwoju narzędzi integrujących wiedzę materiałową, logistyczną, użytkową i środowiskową. Cykl życia pudła nie kończy się w chwili dostawy. Dla włókien jest to często dopiero środek historii.

Co obecnie potrafimy dobrze modelować?

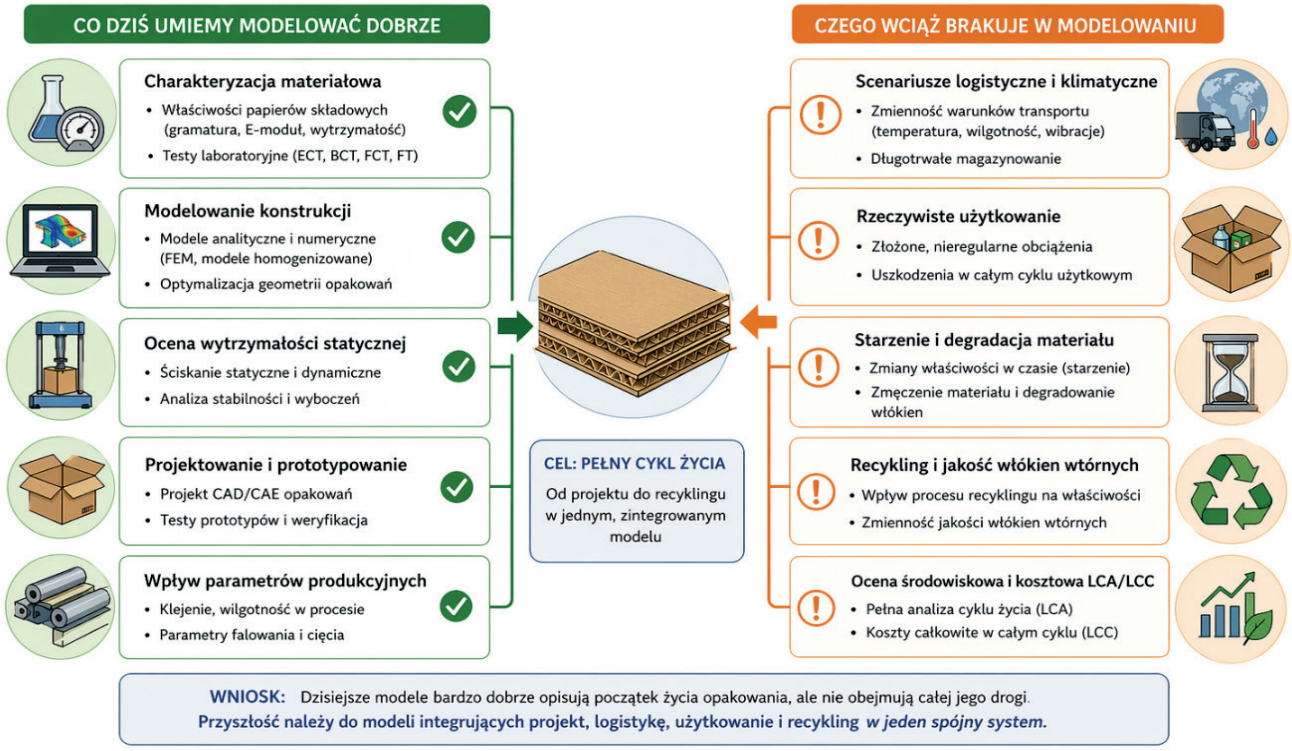
Rozwój nauki o materiałach papierniczych oraz inżynierii opakowań sprawił, że wiele aspektów zachowania tektury falistej potrafimy opisywać z dużą dokładnością. W porównaniu z sytuacją sprzed kilkunastu lat branża dysponuje znacznie dojrzalszym zestawem narzędzi badawczych, obliczeniowych i projektowych. Najważniejsze obszary, w których obecne modelowanie osiągnęło wysoki poziom dojrzałości, zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Obecne możliwości modelowania opakowań z tektury falistej

Obszar	Stan obecny	Poziom dojrzałości
Charakteryzacja materiałowa	ECT, BCT, SCT, gramatura, wilgotność	Wysoki
Modelowanie konstrukcji	MES, modele analityczne, FEFCO	Wysoki
Optymalizacja geometrii	Redukcja masy, prototypowanie	Średni/Wysoki
Monitoring produkcji	Kontrola online parametrów	Średni
Ocena cyklu życia	LCA/LCC fragmentaryczne	Niski

Można stwierdzić, że początek życia pudełka został solidnie opisany przez inżynierię. Zestawienie obszarów dobrze rozwiniętych oraz tych wymagających dalszego rozwoju pokazano na rysunku 2.

Najlepiej rozwiniętym obszarem pozostaje **charakteryzacja materiałowa papierów składowych**. Istotnym etapem rozwoju modeli obliczeniowych było również wyznaczanie zastępczych



Rys. 2. Co dziś umiemy modelować dobrze, a czego wciąż brakuje

właściwości mechanicznych tektury falistej, umożliwiających traktowanie jej jako materiału efektywnego w analizach inżynierskich [2]. Parametry, takie jak: gramatura, grubość, wilgotność, sztywność, wytrzymałość na rozciąganie, ściskanie i zginanie, są rutynowo mierzone i wykorzystywane w kontroli jakości. Dzięki standaryzowanym metodom producenci potrafią porównywać partie surowca oraz utrzymywać stabilność produkcji.

Bardzo dobrze opanowano również **testy użytkowe tektury i opakowań**. Badania ECT, BCT, SCT, RCT czy testy Cobb od lat stanowią praktyczny język komunikacji pomiędzy papiernią, producentem opakowań i klientem końcowym. W ostatnich latach rozwijane są również modele MES, ukierunkowane bezpośrednio na odwzorowanie testu ECT oraz analizę mechanizmów zniszczenia próbki [15]. Parametry te pozwalają ocenić zdolność materiału do pracy w typowych warunkach logistycznych oraz stanowią podstawę specyfikacji handlowych.

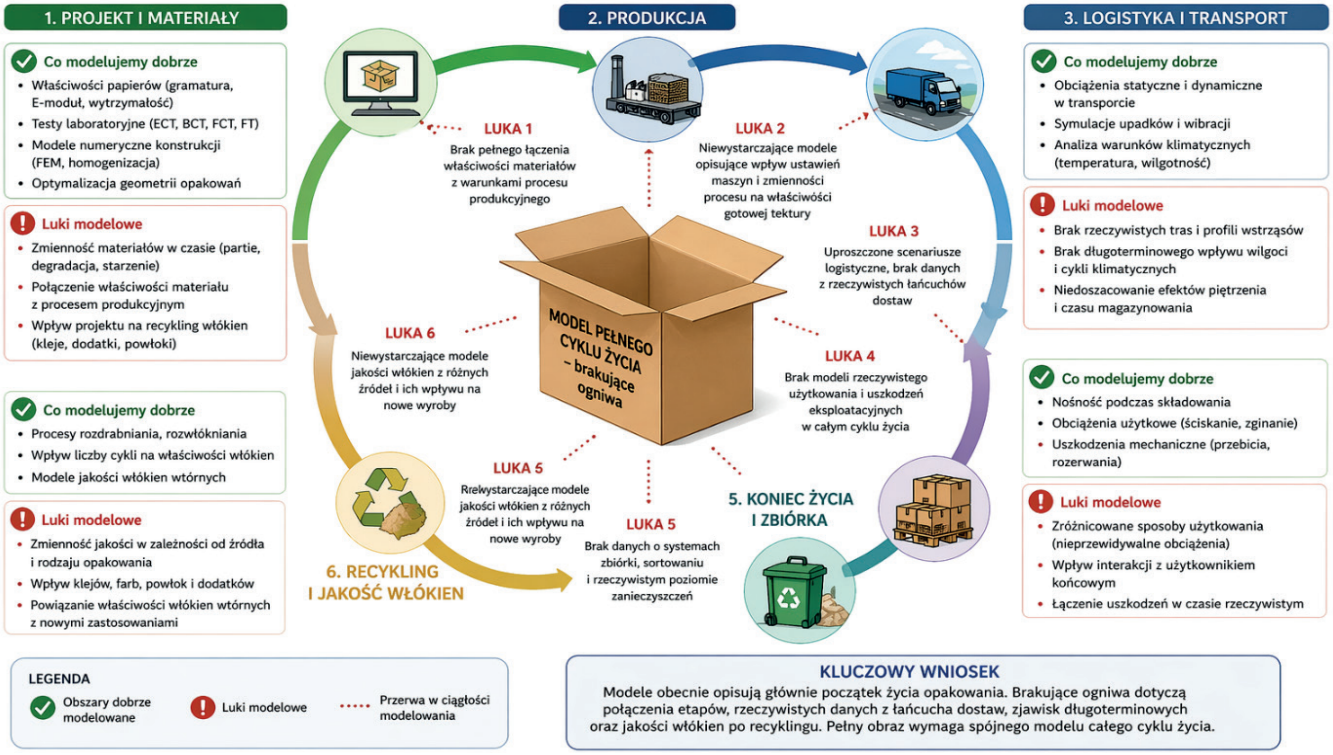
Kolejnym obszarem wysokiej dojrzałości jest **projektowanie konstrukcyjne opakowań**. Branża posiada bogaty katalog sprawdzonych wykrojów, standardów FEFCO, rozwiązań specjalnych oraz procedur doboru opakowania do rodzaju produktu. W wielu przypadkach doświadczenie konstruktorów połączone z prostymi modelami daje bardzo skuteczne rezultaty praktyczne. Współczesne analizy pokazują również znaczenie geometrii fali, w tym rozwiązań mikrofalowych, dla odpowiedzi mechanicznej materiału i nośności konstrukcji [4].

Duży postęp dokonał się także w **modelowaniu numerycznym**, szczególnie z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Do lepiej rozpoznanych parametrów należy dziś również moduł ścinania poprzecznego tektury falistej oraz jego wpływ na odpowiedź paneli warstwowych [12]. Symulacje pozwalają analizować deformacje ścian, wyboczenie, wpływ otworów, pracę naroży, rozmieszczenie naprężeń oraz zachowanie pudełek pod obciążeniem. Ważnym krokiem w rozwoju uproszczonych modeli obliczeniowych było również wprowadzenie analitycznej homogenizacji do modelowania tektury falistej [14]. Zjawiska wyboczeniowe w płytach z tektury falistej analizowano szczegółowo m.in. w pracy [1]. Dzięki temu możliwe jest testowanie wariantów konstrukcyjnych bez konieczności wykonywania pełnej liczby prototypów.

Coraz lepiej rozwinięta jest również **optymalizacja materiałowo-konstrukcyjna**. Wiele przedsiębiorstw potrafi dobierać kombinacje papierów i geometrii tak, aby spełnić wymagania nośności przy możliwie niskiej masie. W tym obszarze ekonomia i mechanika coraz częściej prowadzą wspólny dialog.

Warto podkreślić rosnące możliwości w zakresie **monitoringu procesu produkcyjnego**. Linie tekturnicze wyposażane są w systemy kontroli grubości, wilgotności, geometrii i stabilności parametrów. Dzięki temu jakość materiału jest coraz częściej nadzorowana nie tylko laboratoryjnie, lecz także online.

Mimo tych sukcesów, wspólną cechą większości obecnych modeli jest koncentracja na etapie **produkcji i pierwszego użycia**. Dobrze wiadomo, jakie pudełko opuszcza zakład oraz jak zachowuje się w teście chwilowym. Natomiast brakuje wiedzy, co dzieje się później, z upływem czasu, w różnych warunkach klimatycznych, logistycznych i recyklingu. Zatem współczesna branża świetnie nauczyła się projektować narodziny pudełka, a kolejnym wyzwaniem jest nauczyć się modelować jego dalsze życie.



Rys. 3. Gdzie modele się urywają – mapa luk w modelowaniu

Gdzie modele się urywają?

Mimo dużych postępów w modelowaniu materiału i konstrukcji, wiele obecnych narzędzi kończy swoją historię zbyt wcześnie. Najważniejsze luki obecnych modeli i ich konsekwencje zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Główne luki obecnych modeli opakowań z tektury falistej

Luka modelowa	Opis problemu	Skutek biznesowy
Magazynowanie długoterminowe	Pełzanie i utrata sztywności	Uszkodzenia składowania
Wilgotność i klimat	Zmiana parametrów papieru	Reklamacje
Transport dynamiczny	Wibracje, udary, przeładunki	Straty logistyczne
Użytkowanie klienta	Nieprzewidywalne obciążenia	Zwroty
Recykling	Brak sprzężenia zwrotnego do projektu	Niższa jakość włókien

Najczęściej opisują one moment produkcji, stan początkowy oraz krótkotrwałą odpowiedź opakowania na obciążenie laboratoryjne. Tymczasem rzeczywiste życie pudełka zaczyna się z chwilą, gdy opuszcza ono zakład. To tam pojawiają się zjawiska, które wciąż są modelowane fragmentarycznie lub wcale. Główne miejsca przerwania ciągłości obecnych modeli zestawiono na rysunku 3.

Pierwszym obszarem niedostatecznie ujętym jest **magazynowanie w czasie**. Tektura falista poddana długotrwałemu obciążeniu ulega pełzaniu, stopniowym deformacjom oraz utracie części sztywności. Wiele modeli uwzględnia nośność chwilową, lecz znacznie rzadziej analizuje zachowanie po tygodniu, miesiącu, czy sezonie składowania. A właśnie czas bywa najcichszym przeciwnikiem konstrukcji.

Drugim słabiej opisanym zjawiskiem jest **wpływ wilgotności i zmian klimatycznych**. Papier reaguje na wodę niemal jak żywy organizm – pęcznieje, mięknie, zmienia sztywność i parametry wytrzymałościowe. Numeryczne badania wpływu wilgotności i temperatury na właściwości mechaniczne tektury przedstawiono w [3]. Mimo to wiele decyzji projektowych nadal opiera się na danych z warunków standardowych, które nie zawsze przypominają rzeczywistość magazynu, chłodni, czy kontenera morskiego.

Kolejny punkt zerwania modeli stanowi **transport dynamiczny**. Drgania, obciążenia dynamiczne, wielokrotne przeładunki, nierówności dróg oraz zmienne położenie ładunku oddziałują na opakowanie inaczej niż statyczny test ściskania. Przegląd numerycznych podejść do oceny nośności opakowań wentylowanych pokazuje, jak silnie warunki użytkowania, geometria otworów oraz scenariusze obciążenia wpływają na zachowanie konstrukcji [5].

Niedostatecznie znane jest także **realne użytkowanie przez klienta końcowego**. Opakowania bywają wielokrotnie otwierane, przenoszone, ponownie zamykane, chwilowo przeciążane lub używane niezgodnie z założeniami projektowymi. Klient nie czyta modelu MES przed użyciem pudełka.

Modele często urywają się również na etapie **uszkodzeń częściowych**. Niewielkie zagniecenie naroża, lokalne zawilgocenie, naderwanie klapy, czy mikropęknięcia po transporcie mogą znacząco zmienić dalszą nośność konstrukcji. Tymczasem wiele analiz zakłada idealny stan wyjściowy albo całkowitą awarię, pomijając szarą strefę degradacji pośredniej.

Największą luką pozostaje jednak **koniec życia materiału i recykling**. Decyzje projektowe dotyczące klejów, nadruków, dodatków, gramatury oraz wielomateriałowych elementów wpływają na jakość masy włóknistej, lecz rzadko są modelowane już na etapie konstrukcji. Pudełko znika z analizy wtedy, gdy zaczyna się jego drugie życie – jako surowca.

Problem ma również wymiar organizacyjny. Dane dotyczące projektowania, produkcji, logistyki, reklamacji i recyklingu znajdują się zwykle w różnych systemach i firmach. Model urywa się tam, gdzie kończy się odpowiedzialność jednego działu lub jednego uczestnika łańcucha.

W rezultacie branża dobrze opisuje lokalne fragmenty procesu, lecz słabiej rozumie ich połączenia. To trochę tak, jakby znać anatomię każdego organu, ale nie badać krążenia krwi między nimi. Niestety, obecne modele często kończą się przy bramie zakładu, a przecież dla pudełka to dopiero początek najbardziej interesującej części podróży.

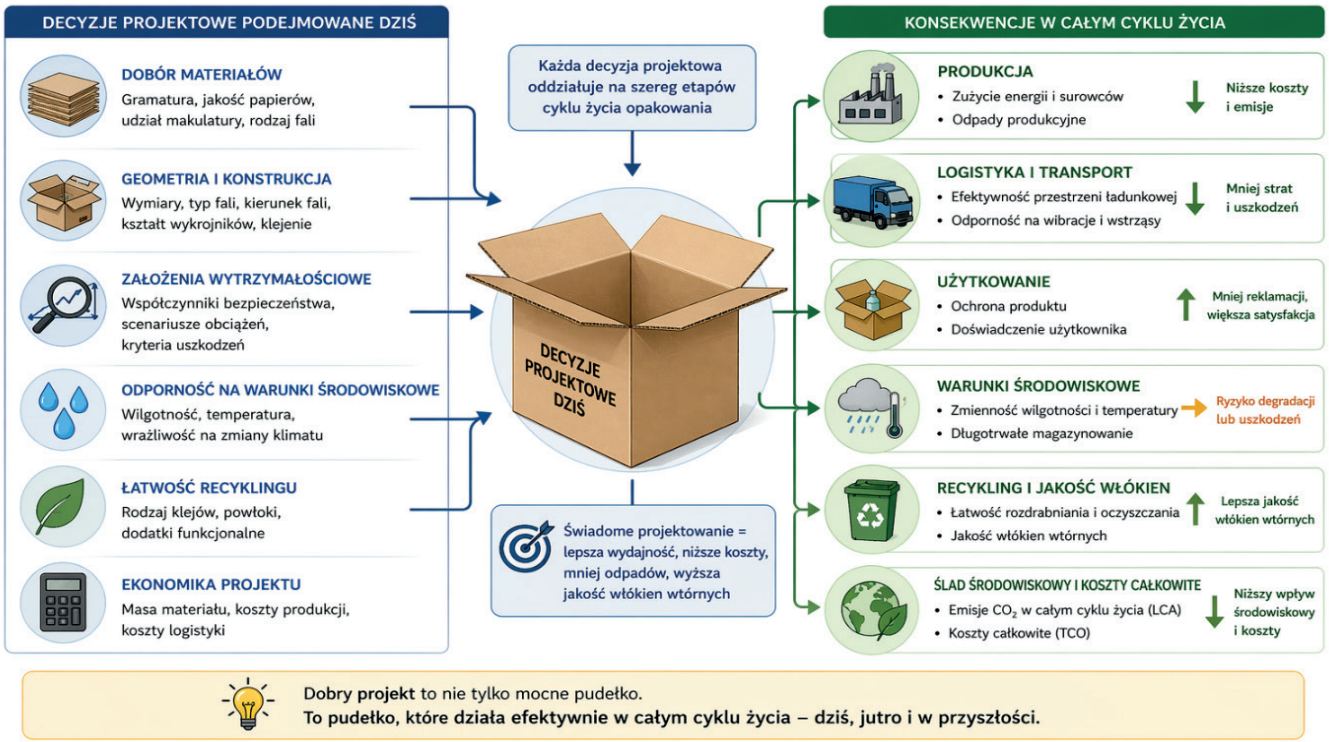
Projekt dziś, konsekwencje jutro

Każde opakowanie z tektury falistej zaczyna się od decyzji projektowych, które często wydają się lokalne i techniczne: wybór gramatury, rodzaju papieru, geometrii pudełka, typu kleju, zakresu nadruku. W rzeczywistości są to decyzje o znacznie dłuższym zasięgu. To, co konstruktor ustala dziś przy biurku, może wpływać na logistykę jutro, koszty za miesiąc i jakość recyklingu w kolejnym cyklu materiałowym. Zależności między decyzjami projektowymi a skutkami w kolejnych etapach życia opakowania przedstawiono na rysunku 4.

Najbardziej oczywistym przykładem jest **dobór materiału**. Cięższe papiery mogą zwiększać nośność, lecz równocześnie podnoszą zużycie surowca, masę transportową i ślad środowiskowy. Zbyt lekkie rozwiązanie może z kolei prowadzić do uszkodzeń produktów, reklamacji oraz dodatkowych transportów zastępczych. Zależność między „odchudzaniem" opakowań a zachowaniem wymaganej nośności szeroko omówiono w pracy Hubbe'a [13]. Każdy gram papieru ma więc podwójne życie – mechaniczne i środowiskowe.

Duże znaczenie ma także **geometria konstrukcji**. Wymiary pudełka wpływają nie tylko na jego wytrzymałość, lecz również na efektywność paletyzacji, wykorzystanie przestrzeni magazynowej oraz liczbę opakowań mieszczących się w pojeździe transportowym. Kilka milimetrów różnicy w projekcie może później oznaczać tysiące pustych litrów powietrza przewożonych po Europie. Na poziomie materiału podobną rolę odgrywa również sam kształt warstwy pofalowanej, który wpływa zarówno na parametry mechaniczne, jak i ekonomikę rozwiązania [11].

Kolejne elementy to **kleje, nadruki i dodatki funkcjonalne**. Rozwiązania poprawiające estetykę, identyfikację marki lub wygodę użytkowania mogą jednocześnie utrudniać recykling lub zwiększać złożoność procesu sortowania. Projektant opakowania współdecyduje więc także o pracy przyszłej papierni.



Rys. 4. Projekt dziś = konsekwencje jutro

Istotne są również **decyzje dotyczące marginesu bezpieczeństwa**. Nadmiernie konserwatywne projektowanie zwiększa koszty materiałowe i emisje związane z produkcją. Zbyt agresywna optymalizacja może generować straty produktowe, zwroty i odpady. Błąd po obu stronach ma swoją cenę.

W praktyce projekt wpływa również na **zachowania użytkownika końcowego**. Opakowanie łatwe do złożenia, wygodne w otwieraniu, czytelnie oznaczone i intuicyjne w segregacji ma większą szansę zostać poprawnie wykorzystane i właściwie zutylizowane. Coraz większe znaczenie ma także **raportowanie środowiskowe i ESG**. Firmy oczekują danych dotyczących masy materiału, udziału surowca wtórnego, emisji transportowych i możliwości recyklingu. To oznacza, że projekt opakowania przestaje być jedynie decyzją techniczną, a staje się elementem strategii biznesowej. Największym wyzwaniem jest fakt, że skutki decyzji projektowych pojawiają się w różnych miejscach i w różnym czasie. Konstruktor widzi koszt arkusza dziś, logistyk odczuwa skutki za tydzień, klient za miesiąc, a recykler przy następnym cyklu materiałowym. Bez wspólnego modelu łatwo optymalizować jeden etap kosztem drugiego. Dlatego nowoczesne projektowanie powinno coraz częściej uwzględniać pełny horyzont skutków, a nie tylko parametr startowy. Pudełko to nie jednorazowy produkt, lecz węzeł w sieci procesów. Zatem rysunek techniczny pudełka jest w istocie mapą przyszłych konsekwencji. Każda linia zagięcia biegnie dalej niż widać na ekranie projektanta.

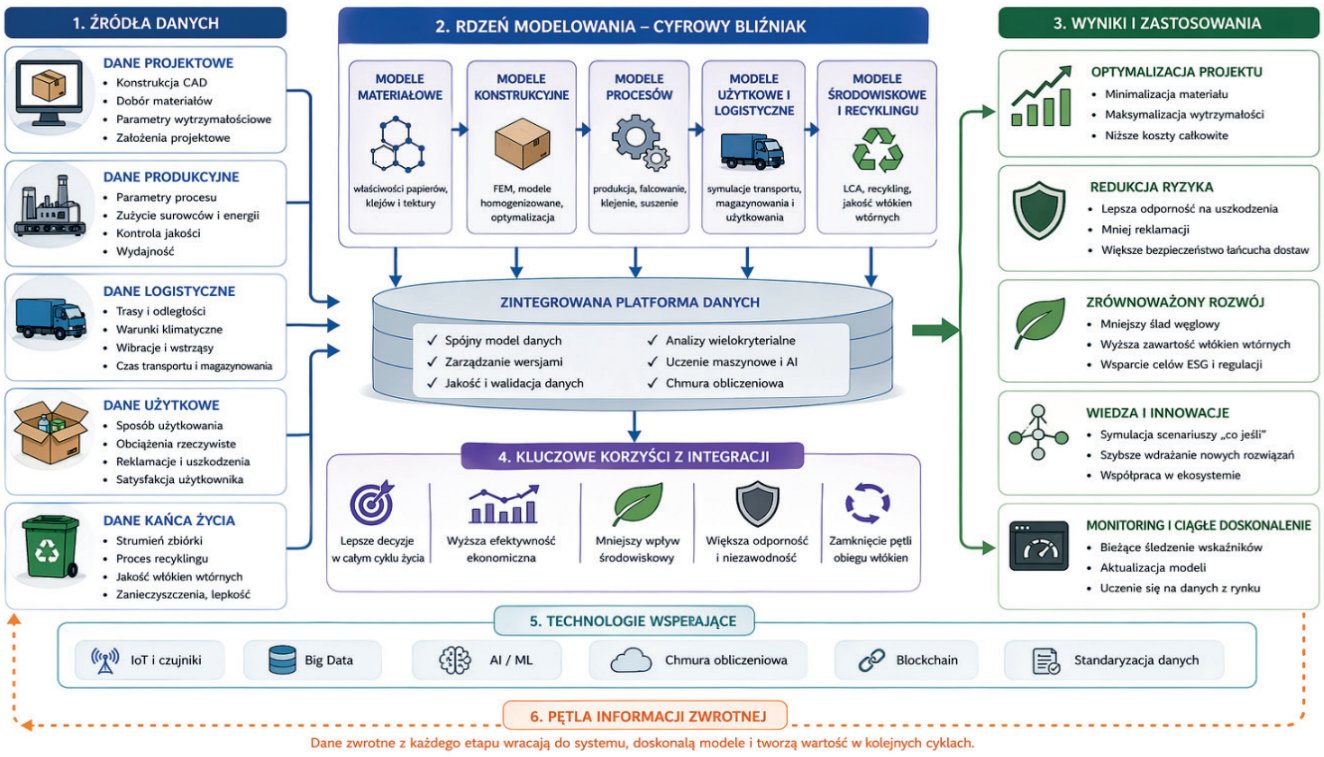
Cyfrowy model pełnego cyklu życia

Jeżeli decyzje projektowe wpływają na kolejne etapy istnienia opakowania, naturalnym krokiem staje się stworzenie narzędzia, które potrafi te zależności śledzić i analizować. Taką rolę może pełnić **cyfrowy model pełnego cyklu życia opakowania**, czyli rozwinięta forma cyfrowego bliźniaka [X], obejmująca nie tylko konstrukcję pudełka, lecz całą jego drogę od projektu po odzysk włókien. Przykładową architekturę takiego rozwiązania przedstawiono na rysunku 5.

W klasycznym ujęciu cyfrowy bliźniak odwzorowuje obiekt fizyczny w świecie danych. W przypadku tektury falistej oznaczałoby to model, który zna geometrię opakowania, rodzaj użytych

Tabela 3. Dane potrzebne do budowy cyfrowego bliźniaka pełnego cyklu życia opakowania

Warstwa danych	Przykładowe dane	Źródło
Projektowa	FEFCO, wymiary, gramatury	CAD/ERP
Produkcyjna	Wilgotność, prędkość linii, odpady	MES/SCADA
Logistyczna	Trasy, czas, temperatura, wstrząsy	TMS/IoT
Użytkowa	Reklamacje, zwroty, uszkodzenia	CRM
Recyklingowa	Czystość strumienia, jakość włókien	Recykler/Papiernia



Rys. 5. Cyfrowy bliźniak pełnego cyklu życia opakowania

papierów, parametry produkcji oraz wyniki badań jakościowych. Jednak prawdziwa wartość pojawia się dopiero wtedy, gdy model nie zatrzymuje się na bramie zakładu. Zakres danych niezbędnych do budowy zintegrowanego modelu pełnego cyklu życia przedstawiono w tabeli 3.

Pierwszą warstwą takiego systemu są **dane projektowe**. Obejmują one konstrukcję FEFCO, wymiary, typ fali, układ warstw, gramatury, rodzaj kleju, zakres nadruku oraz założone scenariusze użytkowania. To cyfrowe DNA opakowania.

Drugą warstwę stanowią **dane produkcyjne**. Parametry linii tekturowej, wilgotność wejściowa i wyjściowa, prędkość produkcji, temperatury sekcji grzewczych, zużycie kleju, odchylenia geometryczne, czy wyniki kontroli jakości pozwalają opisać, jak rzeczywiste pudełko różni się od wersji idealnej z projektu.

Kolejny poziom tworzą **dane logistyczne i eksploatacyjne**. Czas składowania, warunki klimatyczne, drgania transportowe, liczba przeładunków, deformacje jednostek paletowych, reklamacje klientów oraz zwroty pokazują, co opakowanie przeszło poza fabryką. To pamiętnik jego codziennej pracy.

Bardzo cenną warstwą są również **dane końca życia produktu**. Informacje o skuteczności segregacji, jakości makulatury, problemach w rozwłóknianiu, udziale odzyskanych włókien i stratach recyklingowych pozwalają zamknąć pętlę wiedzy. Dzięki temu projektant może zobaczyć konsekwencje swoich decyzji także po użyciu pudełka.

Zintegrowany model może następnie wykorzystywać **algorytmy predykcyjne**. System byłby w stanie przewidzieć ryzyko uszkodzeń przy zmianie gramatury, wpływ nowego nadruku na recykling, korzyści z innego układu paletyzacji, czy opłacalność zmiany konstrukcji dla konkretnego klienta. To przejście od opisu przeszłości do sterowania przyszłością. Taki model nie musi powstać od razu w pełnej skali. Może rozwijać się etapami – najpierw integracja projektu z laboratorium, później z logistyką, następnie z reklamacjami i recyklingiem. Cyfrowy bliźniak dojrzewa podobnie jak samo opakowanie, warstwa po warstwie.

Największą wartością systemu byłaby **pętla uczenia się branży**. Każde uszkodzenie, reklamacja, udana optymalizacja i partia makulatury stawałyby się informacją wzmacniającą kolejne projekty. Można stwierdzić, że obecnie wiele pudełek przechodzi przez świat anonimowo. Cyfrowy model pełnego cyklu życia nadałby im pamięć, a opakowanie, które „pamięta" swoje losy, może stać się znacznie „mądrzejsze" w następnym wcieleniu.

Co zyska branża?

Wdrożenie modelu obejmującego pełny cykl życia opakowania nie byłoby jedynie technologiczną ciekawostką. To narzędzie o bardzo praktycznych konsekwencjach biznesowych, operacyjnych i środowiskowych. Branża opakowaniowa działa w świecie dużych wolumenów i niskich marż jednostkowych, dlatego nawet niewielka poprawa decyzji może przynosić znaczące efekty w skali roku. Kluczowe korzyści wynikające z wdrożenia takiego podejścia zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Główne korzyści wdrożenia modelu pełnego cyklu życia opakowania.

Korzyść wdrożenia	Opis	Horyzont
Lepsze projektowanie	Dobór opakowań do realnych warunków	Krótki
Redukcja materiału	Niższa masa przy zachowaniu bezpieczeństwa	Krótki
Mniej reklamacji	Lepsze dopasowanie logistyczne	Średni
Lepszy recykling	Wyższa jakość włókien wtórnych	Średni
ESG i raportowanie	Spójne wskaźniki środowiskowe	Długi

Pierwszą korzyścią byłoby **lepsze projektowanie opakowań**. Konstruktorzy mogliby oceniać nie tylko wytrzymałość chwilową pudełka, lecz również jego zachowanie po czasie składowania, w konkretnych warunkach klimatycznych i logistycznych. Projekt stałby się bardziej precyzyjny, mniej intuicyjny i lepiej dopasowany do rzeczywistości użytkowania.

Drugim zyskiem byłaby **redukcja nadmiarowego materiału**. Wiele opakowań zawiera margines bezpieczeństwa większy niż faktycznie potrzebny. Jeśli model potrafi wiarygodnie ocenić ryzyko, możliwe staje się odchudzanie konstrukcji bez pogarszania jakości. W świecie milionów pudełek nawet kilka gramów mniej oznacza tony papieru oszczędzonego rocznie.

Bardzo istotną korzyścią jest **ograniczenie strat transportowych i reklamacji**. Lepsze dopasowanie opakowania do realnych warunków zmniejsza liczbę uszkodzeń produktów, zwrotów, konieczności przepakowania oraz sporów jakościowych. To oszczędność nie tylko kosztów bezpośrednich, lecz także czasu ludzi i reputacji marki.

Kolejny obszar to **wyższa efektywność logistyki**. Model obejmujący geometrię opakowania, paletyzację i wykorzystanie przestrzeni transportowej może wskazywać rozwiązania zmniejszające liczbę przewozów lub poprawiające wykorzystanie ładowności pojazdów. Czasem najlepsza optymalizacja pudełka odbywa się nie na stole laboratoryjnym, lecz na naczepie ciężarówki. Znaczenie świadomego projektowania opakowań transportowych z perspektywy bezpieczeństwa, kosztów oraz warunków eksploatacji podkreślono w [10].

Znaczące korzyści pojawiłyby się również w obszarze **recyklingu i gospodarki obiegu zamkniętego**. Projektanci mogliby lepiej rozumieć wpływ klejów, nadruków, dodatków i gramatur na jakość masy włóknistej. To umożliwia tworzenie opakowań nie tylko mocnych i tanich, ale także łatwiejszych do ponownego wykorzystania materiałowego.

Coraz większe znaczenie ma także **raportowanie ESG i ślad środowiskowy**. Firmy potrzebują danych o zużyciu materiału, emisjach transportowych, udziale surowca wtórnego i efektywności recyklingu. Zintegrowany model może przekształcić rozproszone informacje w spójne wskaźniki zarządcze.

Nie można pominąć korzyści organizacyjnych. Połączenie danych z projektowania, produkcji, logistyki i jakości buduje **wspólny język decyzji** między działami. Zamiast sporu „czyje to KPI", pojawia się pytanie „co jest najlepsze dla całego systemu".

W dłuższej perspektywie zyskują również klienci końcowi. Otrzymują opakowania lepiej dopasowane, bardziej niezawodne i często bardziej przyjazne środowisku. To przewaga konkurencyjna, której nie zawsze widać na pierwszy rzut oka, ale którą rynek szybko odczuwa.

Bariery wdrożenia

Choć idea modelowania pełnego cyklu życia opakowania wydaje się logiczna i atrakcyjna, droga do jej praktycznej realizacji nie jest prosta. Największe trudności rzadko wynikają z braku teorii, czy mocy obliczeniowej. Znacznie częściej przeszkodą okazuje się rozproszenie danych, podział odpowiedzialności między uczestnikami rynku oraz codzienna złożoność organizacyjna. Innymi słowy, łatwiej narysować idealny system niż połączyć realne firmy. Najważniejsze bariery wdrożenia oraz możliwe kierunki ich ograniczania przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Bariery wdrożenia modelowania pełnego cyklu życia opakowania

Bariera	Charakter bariery	Możliwy kierunek rozwiązania
Rozproszenie danych	Organizacyjna	Wspólna platforma danych
Brak standardów	Techniczna	Ujednolicenie formatów
Niechęć do dzielenia się danymi	Biznesowa	Modele zaufania / NDA
Koszty wdrożenia	Finansowa	Pilotaże etapowe
Brak kompetencji analitycznych	Kadrowa	Szkolenia i partnerstwa

Pierwszą barierą jest **fragmentacja informacji**. Dane projektowe znajdują się zwykle u producenta opakowań, dane produkcyjne w zakładzie, dane logistyczne u przewoźnika lub klienta, a informacje o recyklingu w kolejnych ogniwach łańcucha. Każdy posiada część układanki, lecz rzadko ktoś widzi cały obraz.

Drugim problemem jest **brak wspólnych standardów danych**. Nawet jeśli informacje istnieją, bywają zapisane w różnych formatach, z różnym poziomem szczegółowości i bez łatwej możliwości łączenia. Jedna firma mówi językiem ton i palet, druga KPI transportowych, trzecia gramatur i BCT. System bez wspólnego słownika łatwo zamienia się w wieżę Babel z tektury.

Istotną barierą pozostaje także **niechęć do dzielenia się danymi**. Część informacji ma charakter handlowy, technologiczny lub strategiczny. Firmy obawiają się ujawniania kosztów, parametrów produkcji, reklamacji, efektywności procesów, a model pełnego cyklu życia potrzebuje zaufania równie mocno jak algorytmów.

Kolejne wyzwanie dotyczy **pomiaru końca życia produktu**. Stosunkowo łatwo zbierać dane z produkcji, trudniej z transportu, a jeszcze trudniej z recyklingu i rzeczywistego zachowania użytkownika końcowego. Wiele pudełek znika ze ścieżki obserwacji w momencie dostawy, choć właśnie wtedy zaczyna się najciekawszy etap danych środowiskowych.

Ważnym ograniczeniem są również **koszty i priorytety inwestycyjne**. Integracja systemów, czujniki, platformy danych, analityka oraz utrzymanie narzędzi wymagają nakładów. Dla części firm bardziej namacalny wydaje się zakup nowej maszyny niż inwestycja w cyfrową widzialność procesu.

Nie można pominąć czynnika ludzkiego. Model obejmujący cały cykl życia wymaga **współpracy między działami**, które dotychczas pracowały osobno: konstrukcja, produkcja, sprzedaż, logistyka, jakość, zrównoważony rozwój. To często zmiana kultury organizacyjnej, a nie tylko wdrożenie oprogramowania.

Pojawia się także problem **nadmiaru danych bez wniosków**. Samo gromadzenie informacji nie daje przewagi, jeśli organizacja nie potrafi zamienić ich w decyzje projektowe i procesowe. Cyfrowe archiwum nie jest jeszcze inteligencją operacyjną.

Mimo tych trudności większość barier ma charakter przejściowy. Technologie integracyjne dojrzewają, rośnie presja raportowania środowiskowego, a łańcuchy dostaw coraz częściej oczekują transparentności. To oznacza, że przeszkody z dzisiejszego dnia mogą stać się standardem jutra. Można stwierdzić, że największym wyzwaniem nie jest zbudowanie modelu pudełka, lecz modelu współpracy wokół niego. Gdy ludzie i dane zaczną podróżować razem, reszta ruszy za nimi.

Czy recykling powinien wrócić do projektowania?

Przez wiele lat recykling traktowano jako etap końcowy, oddzielony od procesu projektowania opakowania. Najpierw tworzono pudełko spełniające wymagania handlowe i logistyczne, a dopiero później zastanawiano się, co stanie się z nim po użyciu. W realiach gospodarki obiegu zamkniętego taki podział staje się coraz mniej aktualny. Recykling nie powinien zaczynać się przy pojemniku na makulaturę, lecz już przy pierwszym szkicu konstrukcyjnym.

Każda decyzja projektowa wpływa bowiem na późniejszą możliwość odzysku włókien. Dobór papierów, udział surowca wtórnego, gramatura, liczba warstw i zastosowane dodatki chemiczne kształtują nie tylko parametry użytkowe, lecz także zachowanie materiału podczas rozwłókniania i ponownego przetwarzania. Projektant decyduje więc równocześnie o pierwszym i kolejnym życiu opakowania.

Szczególne znaczenie mają **kleje, nadruki, laminaty i elementy wielomateriałowe**. Rozwiązania atrakcyjne marketingowo lub funkcjonalnie mogą komplikować sortowanie, obniżać czystość strumienia surowca albo pogarszać jakość odzyskanych włókien. To nie argument przeciw innowacjom, lecz za świadomym bilansem korzyści i kosztów środowiskowych.

Coraz ważniejszą koncepcją staje się **projektowanie z myślą o łatwym odzysku materiału** (*design for recycling*). Obejmuje ono uproszczenie struktury opakowania, ograniczanie zbędnych dodatków, dobór kompatybilnych materiałów oraz czytelne oznaczenia ułatwiające segregację. Opakowanie dobrze zaprojektowane do recyklingu oszczędza energię i surowce również po zakończeniu swojej pierwszej funkcji.

Jeszcze dalej idzie idea **projektowania pod kątem jakości kolejnego życia włókien** *(design for second fibre life)*. Chodzi nie tylko o to, aby pudełko dało się przetworzyć, ale aby odzyskany

materiał nadal miał wysoką wartość użytkową. To subtelna, lecz ważna różnica między „można odzyskać" a „warto odzyskać". W praktyce oznacza to potrzebę bliższej współpracy między projektantami opakowań, producentami papieru i sektorem recyklingu. Informacje o problemach rozwłókniania, zanieczyszczeniach czy spadku jakości włókien powinny wracać do fazy projektowej jako sprzężenie zwrotne. Dziś te światy zbyt często spotykają się dopiero wtedy, gdy problem już istnieje.

Recykling wracający do projektowania ma również wymiar ekonomiczny. Rosnące ceny surowców, wymagania regulacyjne oraz oczekiwania klientów sprawiają, że opakowania łatwiejsze do ponownego wykorzystania stają się przewagą konkurencyjną, a nie wyłącznie gestem w stronę ekologii. Nie oznacza to oczywiście, że każde pudełko musi być projektowane wyłącznie pod recykling. Opakowanie nadal musi chronić produkt, być opłacalne i funkcjonalne. Chodzi o równowagę, w której koniec życia produktu staje się jednym z kryteriów początku projektu.

Przyszłość – inteligentne opakowanie cyrkularne

Połączenie projektowania, danych eksploatacyjnych, logistyki i recykling w jeden spójny system myślenia, naturalnie przynosi wizję kolejnego etapu rozwoju branży – inteligentnego opakowania cyrkularnego. Nie chodzi tu wyłącznie o pudełko wyposażone w elektronikę, lecz o opakowanie zaprojektowane tak, aby uczyć się z własnego cyklu życia i coraz lepiej funkcjonować w obiegu zamkniętym. Docelową wizję inteligentnego, cyrkularnego opakowania pokazano na rysunku 6.

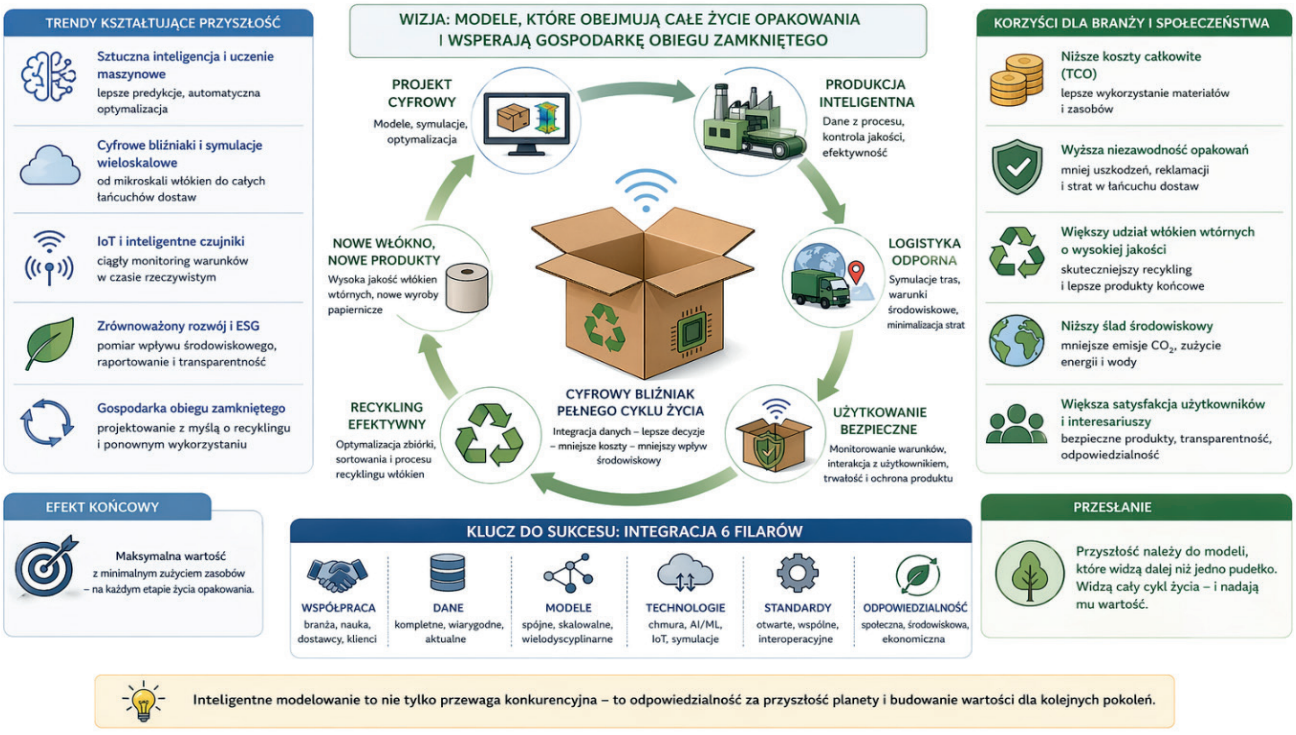
Pierwszą cechą takiego podejścia będzie **projektowanie adaptacyjne**. Konstrukcja opakowania nie będzie tworzona raz na wiele lat, lecz stale doskonalona na podstawie danych z produkcji, transportu, reklamacji i recyklingu. Każda partia może wnosić wiedzę do kolejnej generacji rozwiązania.

Drugim filarem stanie się **cyfrowa identyfikowalność materiału**. Kody, znaczniki, systemy śledzenia partii lub cyfrowe paszporty produktu mogą umożliwić poznanie składu materiałowego, historii użytkowania oraz najlepszej ścieżki odzysku. Pudełko przestaje być anonimowym odpadem, a staje się nośnikiem informacji o sobie samym.

Istotną rolę odegra **sztuczna inteligencja wspierająca decyzje**. Algorytmy będą mogły rekomendować optymalny dobór papierów, przewidywać ryzyko uszkodzeń, oceniać ślad środowiskowy wariantów konstrukcyjnych i wskazywać rozwiązania najkorzystniejsze dla recyklingu. Projektant zyska partnera, który liczy szybciej, ale decyzję nadal podejmuje człowiek. Potencjał sztucznej inteligencji w predykcji wytrzymałości opakowań tekturowych oraz wspomaganiu procesów projektowych pokazano już w [7].

Kolejnym elementem będzie **modularność i różnicowanie scenariuszy**. Zamiast jednego uniwersalnego pudełka do wszystkich zastosowań, pojawią się rodziny opakowań dopasowane do różnych tras, produktów, poziomów ryzyka i oczekiwań środowiskowych. Inteligencja systemu będzie polegała na precyzji dopasowania, nie na przesadzie materiałowej.

Ważna stanie się także **jakość drugiego życia włókien**. Opakowania przyszłości będą oceniane nie tylko za nośność i cenę, ale również za to, jak wartościowy materiał oddają do kolejnego cyklu produkcyjnego. Wskaźniki recyklingowe mogą stać się



Rys. 6. Przyszłość modelowania tektury falistej – inteligentne, cyrkularne opakowanie

równie istotne jak BCT czy ECT. W szerszym ujęciu rozwojowym warto również uwzględniać nowe geometrie warstwy pofalowanej oraz wynikające z nich potencjalne korzyści mechaniczne i materiałowe [8].

Zmieni się również relacja z klientem końcowym. Opakowanie może komunikować sposób segregacji, możliwość ponownego użycia, pochodzenie surowca lub ślad środowiskowy. Pudełko stanie się nośnikiem zaufania marki, a nie jedynie osłoną produktu.

W szerszej perspektywie inteligentne opakowanie cyrkularne oznacza przejście od modelu liniowego „wyprodukuj, użyj, wyrzuć" do modelu „zaprojektuj, użyj, odzyskaj, ulepsz". Każdy cykl zamyka się wiedzą, która wzmacnia następny. Oczywiście droga do tej przyszłości wymaga standardów danych, współpracy międzybranżowej oraz inwestycji. Jednak kierunek jest coraz wyraźniejszy – mniej anonimowego kartonu, więcej świadomego systemu materiałowego. Kierunek ten dobrze wpisuje się w ideę inteligentnej tektury falistej rozwijanej w realiach Przemysłu 5.0 oraz nowoczesnych, zintegrowanych systemów produkcyjnych [9]. Tak więc pudełko przyszłości nie będzie tylko opakowaniem produktu, ale opakowaniem doświadczenia, danych i kolejnej szansy dla własnych włókien.

Wnioski

Tektura falista należy do najlepiej rozpoznanych materiałów opakowaniowych pod względem badań wytrzymałościowych, technologii produkcji oraz praktyki projektowej. Branża skutecznie modeluje dziś wiele kluczowych zjawisk związanych z początkiem życia opakowania: dobór materiałów, geometrię konstrukcji, parametry ECT i BCT czy zachowanie pudełka w standardowych warunkach obciążenia. Jest to solidny fundament współczesnego opakowalnictwa.

Jednocześnie analiza pokazuje, że obecne podejście bywa niepełne, ponieważ zbyt często kończy się na etapie produkcji lub pierwszego użycia. Tymczasem rzeczywiste życie opakowania obejmuje: magazynowanie, wpływ wilgotności, transport dynamiczny, zachowania użytkownika końcowego oraz recykling włókien. To właśnie w tych późniejszych etapach powstają koszty, ryzyka i szanse, których nie widać na samym rysunku technicznym.

Decyzje projektowe podejmowane na początku procesu mają konsekwencje znacznie wykraczające poza nośność pudełka. Wpływają na efektywność logistyki, zużycie materiału, liczbę reklamacji, możliwość odzysku włókien oraz ślad środowiskowy produktu. Oznacza to, że projektowanie opakowania staje się zadaniem systemowym, a nie wyłącznie konstrukcyjnym.

Rozwiązaniem może być rozwój **zintegrowanych modeli pełnego cyklu życia**, łączących dane projektowe, produkcyjne, eksploatacyjne i recyklingowe. Takie narzędzia umożliwiają bardziej precyzyjne decyzje materiałowe, redukcję nadmiarowych zapasów bezpieczeństwa, lepsze dopasowanie opakowań do scenariuszy logistycznych oraz wspieranie gospodarki obiegu zamkniętego.

Szczególne znaczenie zyskuje powrót recyklingu do fazy projektowej. Opakowanie przyszłości powinno być oceniane nie tylko za to, jak chroni produkt dziś, ale również za to, jak wartościowy materiał odda jutro do kolejnego cyklu produkcyjnego.

Największym wyzwaniem pozostaje obecnie nie brak wiedzy technicznej, lecz integracja danych, współpraca pomiędzy uczestnikami łańcucha dostaw oraz zmiana perspektywy zarządczej z lokalnej na całościową. To zadanie trudne, lecz coraz bardziej konieczne w realiach presji kosztowej i środowiskowej.

Można więc stwierdzić, że brakującym ogniwem w modelowaniu tektury falistej nie jest kolejny test laboratoryjny, lecz dłuższy horyzont myślenia. Funkcjonowanie pudła nie kończy się na dostawie. Przyszłość branży będzie należała do tych, którzy nauczą się projektować nie tylko opakowanie, lecz cały jego cykl życia.

Artykuł recenzowany

LITERATURA

[1] Bai Q., Wang J., Chen Y. 2019. "Investigation on the buckling behavior of corrugated cardboard plates". *Composite Structures* 220: 57-66. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.03.076.

[2] Biancolini M.E. 2005. "Evaluation of equivalent stiffness properties of corrugated board". *Composite Structures* 69 (3) : 322-328. DOI: 10.1016/j.compstruct.2004.07.014.

[3] Cornaggia A., Gajewski T., Knitter-Piątkowska A., Garbowski T. 2023. "Influence of humidity and temperature on mechanical properties of corrugated board – numerical investigation". *BioResources* 18 (4) : 7490-7509. DOI: 10.15376/biores.18.4.7490-7509.

[4] Di Russo F.M., Desole M.M., Gisario A., Barletta M. 2023. "Evaluation of wave configurations in corrugated boards by experimental analysis (EA) and finite element modeling (FEM): the role of the micro-wave in packaging design". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 126: 4963-4982. DOI: 10.1007/s00170-023-11397-y.

[5] Fadiji T., Coetzee C.J., Opara U.L. 2018. "Compression strength of ventilated corrugated packaging boxes: Numerical modelling approaches – A review". *Biosystems Engineering* 166: 57-72. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.11.011.

[6] Frank B. 2014. "Corrugated Box Compression – A Literature Survey". *Packaging Technology and Science* 27 (2) : 105-128. DOI: 10.1002/pts.2019.

[7] Gajewski T., Grabski J.K., Cornaggia A., Garbowski T. 2024. "On the use of artificial intelligence in predicting the compressive strength of various cardboard packaging". *Packaging Technology and Science* 37 (2) : 97-105. DOI: 10.1002/pts.2783.

[8] Garbowski T. 2025. "Exploring the Future of Novel Flute Shapes and Their Mechanical Benefits". *BioResources* 20 (2) : 2483-2486. DOI: 10.15376/biores.20.2.2483-2486.

[9] Garbowski T. 2025. "Intelligent Corrugated Board in the Era of Industry 5.0". *Przegląd Papierniczy* 81 (6) : 303-313. DOI: 10.15199/54.2025.6.2.

[10] Garbowski T. 2025. "Smart transport packaging design – how to optimize safety and cost?". *Przegląd Papierniczy* 81 (7) : 351-358. DOI: 10.15199/54.2025.7.1.

[11] Garbowski T., Borecki P. 2024. "Analysis of the impact of futuristic corrugated layer shape on mechanical properties and cost of single-wall corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 80 (11) : 609-615. DOI: 10.15199/54.2024.11.1.

[12] Garbowski T., Gajewski T. 2020. "Transverse shear modulus of corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 76 (2) : 103-108. DOI: 10.15199/54.2020.2.1.

[13] Hubbe M.A. 2017. "Lightweighting of corrugated packaging: A review of the effect of paper properties on box strength". *BioResources* 12 (4) : 9403-9426.

[14] Talbi N., Batti A., Ayad R., Guo Y.Q. 2009. "An analytical homogenization model for finite element modeling of corrugated cardboard". *Composite Structures* 88 (2) : 280-289. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.04.008.

[15] Zhang Q., Cai H. 2021. "Finite element analysis of edge crush test of corrugated board". *Packaging Technology and Science* 34 (3) : 163-172. DOI: 10.1002/pts.2543.