

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU



Agnieszka Szperling

Model oceny cyrkularności i jego weryfikacja na przykładzie wybranego środka transportu

Rozprawa doktorska

Promotor:

Dr hab. inż. Przemysław Kurczewski, prof. PP

Poznań, 2026

Model oceny cyrkularności i jego weryfikacja na przykładzie wybranego środka transportu

Streszczenie

W pracach naukowych na temat gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) dominują badania poświęcone zagadnieniom makroekonomicznym, organizacyjnym i środowiskowym. Marginalizowane są w nich aspekty inżynierskie istotne zwłaszcza z perspektywy projektowania obiektów technicznych pod kątem ich cyrkularności. Jest to problem, który przekłada się na ograniczenia w efektywności wdrażania koncepcji GOZ, m.in. w zakresie praktyki funkcjonowania przedsiębiorstw. Jest to też nisza badawcza, gdyż to właśnie obiekty techniczne są materialnym nośnikiem wartości cyrkularnej w postaci różnego rodzaju zasobów. Dlatego w niniejszej rozprawie doktorskiej podjęto problematykę gospodarki o obiegu zamkniętym w ujęciu technicznym i produktowym, uzupełniając istotne luki badawcze zidentyfikowane w tym obszarze.

Za główny cel pracy przyjęto opracowanie modelu oceny cyrkularności, który mógłby służyć analizie jednostek pływających pod kątem ich zgodności z założeniami koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Założono, że opracowany model winien mieć taki potencjał, aby mógł być punktem wyjścia do prac nad zastosowaniem go w szerszym zakresie – w odniesieniu do środków transportu, a w dalszej perspektywie, także do różnych kategorii obiektów technicznych.

W pierwszej części pracy scharakteryzowano zagadnienia związane z genezą podjętych prac badawczych. Omówiono sposoby wdrażania koncepcji GOZ, metody wykorzystywane do pomiaru efektów tych działań oraz wskazano praktyczne przykłady stosowania GOZ.

W dalszej części pracy poddano analizie kluczowe aspekty cyrkularności rozumianej jako cecha obiektu, charakteryzująca jego potencjał do pozostawania w użytkowaniu (szerzej w obrocie gospodarczym) z uwzględnieniem stopnia odpadowości lub statusu odpadu. Dla każdego aspektu sformułowano zależności matematyczne pozwalające na określenie poziomu zgodności jednostek pływających z założeniami koncepcji GOZ, czyli na ilościową ocenę poziomu ich cyrkularności. W ten sposób powstał zestaw wskaźników ilościowych, do których stosowania konieczne było opracowanie klasyfikacji (uciążliwości środowiskowej, podatności recyklingowej i zdolności do utylizacji termicznej) wybranych materiałów i komponentów stosowanych w budowie jednostek pływających. Przeprowadzono również badania, które doprowadziły do integracji wskaźników jednostkowych (z uwzględnieniem ich istotności z perspektywy koncepcji GOZ). W ten sposób powstał sumaryczny wskaźnik cyrkularności, który w postaci jednej liczby wyraża poziom spełnienia postulatów odpowiadających wszystkim aspektom GOZ.

Ostatecznie, opracowany model oceny cyrkularności zweryfikowano na przykładzie wybranej jednostki pływającej. Określono dla niej poziom spełnienia założeń wynikających z GOZ w ramach poszczególnych aspektów tej koncepcji, w postaci zbioru poszczególnych wskaźników cyrkularności oraz w sposób zintegrowany, w formie sumarycznego wskaźnika cyrkularności. Przeprowadzone prace badawcze dały podstawy do stwierdzenia, że opracowany model oceny cyrkularności ma potencjał, aby być stosowanym nie tylko w odniesieniu do innych rodzajów środków transportu, ale też do różnych obiektów technicznych.

Circularity assessment model and its verification on the example of a selected means of transport

Abstract

Scientific works on the circular economy (CE) are dominated by research on macroeconomic, organizational, and environmental issues. They marginalize engineering aspects, particularly those crucial for designing technical facilities with circularity in mind. This problem has an impact on limitations in the effective implementation of the CE concept, including in the practical operation of economic entities. This is also a significant research niche, as technical facilities are the material carriers of circular value in the form of various resources. Therefore, this doctoral dissertation addresses the issue of the circular economy from a technical and product perspective, filling significant research gaps identified in this area.

The main goal of this work was to develop a circularity assessment model that could be used to analyze vessels for compliance with the circular economy. It was assumed that the developed model should have the potential to serve as a starting point for broader application – to means of transport and, in the longer term, to various categories of technical facilities.

The first part of the dissertation outlines the issues related to the genesis of the research undertaken. It discusses the methods for implementing the circular economy concept, the methods used to measure the effects of these activities, and provides practical examples of its application.

The next part of the paper analyzes key aspects of circularity, understood as a feature of an object that characterizes its potential to remain in use (more broadly, in economic circulation), taking into account the degree of waste or waste status. For each aspect, mathematical relationships were formulated to determine the level of compliance of vessels with the assumptions of the circular economy concept, i.e., to quantitatively assess their level of circularity. This resulted in the creation of a set of quantitative indicators, which required the development of a classification (environmental nuisance, recyclability, and thermal utilization) of selected materials and components used in the construction of vessels. A research was also conducted, leading to the integration of individual indicators (taking into account their significance from the perspective of the circular economy concept). This resulted in the creation of an aggregate circularity indicator, which – in a form of a single number – expresses the level of compliance with the postulates corresponding to all aspects of the circular economy.

Finally, the developed circularity assessment model was verified using a selected vessel as an example. The degree of compliance with the assumptions arising from the circular economy was determined: (1) for each aspect of the concept, using a set of individual circularity indicators and (2) as an integrated approach, using an aggregate circularity indicator. The research conducted provided the basis for conclusion that the developed circularity assessment model has the potential to be applied not only to other transport means, but also to various other technical facilities.

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	7
2. ZAGADNIENIA GOSPODARKI O OBIEGU ZAMKNIĘTYM	10
2.1. Rozwój koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym	10
2.2. Sposoby wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym	14
2.3. Metody stosowane w mierzeniu efektów wprowadzania gospodarki o obiegu zamkniętym	23
2.3.1. Analiza przepływów materiałowych MFA	23
2.3.2. Wskaźnik MCI	25
2.3.3. Wskaźnik CEI	26
2.3.4. Wskaźnik C-index	27
2.3.5. Certyfikacja C2C	28
2.3.6. Metody kwestionariuszowe	29
2.3.7. Wskaźnik jakości gospodarki o obiegu zamkniętym	32
2.3.8. Mierniki stosowane do oceny wdrażania GOZ	33
2.4. Przykłady wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym	34
2.4.1. Przemysł opakowaniowy	34
2.4.2. Przemysł motoryzacyjny	35
2.4.3. Przemysł budowlany	37
2.4.4. Przemysł elektroniczny	38
2.4.5. Przemysł tekstylny i odzieżowy	39
2.4.6. Przemysł jachtowy	41
3. CEL I ZAKRES PRACY	45
4. MODEL OCENY CYRKULARNOŚCI	48
4.1. Podstawy modelu – analizowane aspekty	48
4.2. Wskaźniki modelu oceny cyrkularności	66
4.2.1. Ramy modelu	66
4.2.2. Wskaźnik intensywności użytkowania jachtu	66
4.2.3. Wskaźnik zastosowania materiałów pierwotnych w budowie jachtu	67
4.2.4. Wskaźnik uciążliwości środowiskowej materiałów zastosowanych w budowie jachtu	68
4.2.5. Wskaźnik minimalizacji masy jachtu	69
4.2.6. Wskaźnik zastosowania komponentów recykulowanych w jachcie	70
4.2.7. Wskaźnik potencjału do ponownego użycia komponentów jachtu	71
4.2.8. Wskaźnik naprawialności jachtu	71
4.2.9. Wskaźnik potencjału do realizacji regeneracji (remanufacturingu) jachtu	73

4.2.10. Wskaźnik potencjału do pełnienia innych funkcji (niż pierwotnie nadane) po przywróceniu sprawności użytkowej ...	74
4.2.11. Wskaźnik zdolności do recyklingu	75
4.2.12. Wskaźnik zdolności do utylizacji termicznej	76
4.3. Główne składowe modelu oceny cyrkularności	77
4.4. Klasyfikacje związane z modelem oceny cyrkularności	80
4.4.1. Typologia komponentów jachtu	80
4.4.2. Klasyfikacja materiałów ze względu na uciążliwość środowiskową	83
4.4.3. Klasyfikacja komponentów ze względu na podatność recyklingową	87
4.4.4. Klasyfikacja materiałów ze względu na zdolność do utylizacji termicznej	90
5. WERYFIKACJA MODELU OCENY CYRKULARNOŚCI	93
5.1. Wybór i charakterystyka obiektu badań	93
5.1.1. Klasyfikacja jachtów w świetle norm i przepisów	93
5.1.2. Wybór obiektu badań	95
5.1.3. Charakterystyka obiektu badań	97
5.2. Ocena cyrkularności wybranej konstrukcji jachtowej	100
5.2.1. Inwentaryzacja danych	100
5.2.2. Obliczenia wskaźników cyrkularności	103
5.2.3. Sumaryczny wskaźnik cyrkularności	113
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	118
LITERATURA	122
ZAŁĄCZNIKI	133
Załącznik 1	133
Załącznik 2	139
Załącznik 3	143

1. WSTĘP

Zwiększająca się produkcja różnego rodzaju dóbr wywołuje na świecie szereg konsekwencji. Wśród nich wymienia się m.in. kryzys klimatyczny i surowcowy. Powszechnie uważa się, że zmiany klimatu związane z działalnością człowieka wynikają w znacznej mierze z szeroko rozumianej produkcji przemysłowej, której towarzyszy wyczerpywanie zasobów naturalnych oraz emisja wielu szkodliwych związków do środowiska. Produkty wprowadzane do obiegu gospodarczego w wyniku działalności przemysłowej również generują różnego rodzaju obciążenia środowiskowe zwłaszcza, jeśli weźmie się pod uwagę nie tylko ich produkcję, ale też procesy eksploatacji i zagospodarowania po użytkowaniu. Rosnąca liczba produktów znajduje natomiast odzwierciedlenie we wzroście ilości odpadów, co jest szczególnie istotne, jeśli są to odpady trudne do przetworzenia. Składowiska odpadów zajmują coraz więcej przestrzeni, a zanieczyszczenie gleby, wód i powietrza związane z rosnącą ilością odpadów w ekosystemie bezpośrednio wpływają na jego degradację.

Świadomość konieczności zmian opisanego powyżej stanu rzeczy nie jest jedynie rezultatem troski o stan środowiska naturalnego przekładającego się m.in. na zdrowie ludzi. Wynika ona również z tego, że intensywna eksploatacja zasobów naturalnych prowadzi do ich niedoborów i przekłada się na wzrost cen, a to zagraża stabilności gospodarek państw i świata. Są to przyczyny, z powodu których coraz częściej mówi się o potrzebie odchodzenia od modelu „wytwórz-zużyj-wyrzucić” w działalności gospodarczej człowieka.

Wyrazem takiego sposobu myślenia jest m.in. koncepcja gospodarki o obiegu zamkniętym (w skrócie określana w niniejszej rozprawie również jako GOZ). Zakłada ona takie kształtowanie produktów, aby wykorzystane do ich produkcji surowce mogły krążyć w obiegu gospodarczym jak najdłużej, m.in. dzięki wysokiej trwałości i procesom powtórnego wykorzystania materiałów po procesie użytkowania, co znajduje przełożenie na minimalizację ilości odpadów, które według koncepcji GOZ należy traktować jako potencjalne zasoby. Ten sposób myślenia ma szczególne zastosowanie w odniesieniu do różnego rodzaju obiektów technicznych wprowadzanych do obrotu gospodarczego. Są one bowiem nośnikami zasobów, które wchodzi w skład ich struktury, a ich wytworzenie wiąże się z nakładami energetycznymi i materiałowymi. Zasadne jest zatem maksymalne wykorzystanie tych zasobów, które w naturalny sposób wpisane są w cały cykl życia obiektów technicznych.

Z tej perspektywy szczególne znaczenie ma praca inżynierów. Kluczowe decyzje determinujące poziom zużycia surowców i energii podejmowane są bowiem przez nich już na etapie projektowania. W procesie kształtowania konstrukcji, doboru materiałów czy technologii wytwarzania zasadne jest uwzględnianie nie tylko wymagań projektowych związanych z cechami użytkowymi, czy aspektami ekonomicznymi, ale też rozważanie scenariuszy dotyczących procesu eksploatacji i zagospodarowania obiektów po użytkowaniu. Szeroko rozumiane efekty pracy inżynierów znajdują

przełożenie nie tylko na same produkty i systemy produkcyjne, ale są realnym nośnikiem zasobów energetycznych i materiałowych. Inżynierowie powinni zatem dysponować narzędziami, które wspomagają ich w podejmowaniu decyzji związanych z wyborami, jakich muszą dokonywać. Chodzi przykładowo o dylematy związane z tym, czy użyte w produkcji materiały mają się cechować niskim negatywnym wpływem na środowisko, czy też ich wpływ może być większy w zamian za zapewnienie większej trwałości produktu.

Koncepcja GOZ definiowana jest w literaturze na wiele różnych sposobów. Wiele z definicji koncentruje się na aspektach makroekonomicznych, organizacyjnych oraz środowiskowych, marginalizując przy tym rolę GOZ w technice, w tym w szczególności w inżynierii obiektów technicznych. Z tego faktu wyłania się istotna nisza w badaniach naukowych dotyczących GOZ. Brakuje bowiem narzędzi, które ukierunkowują działania inżynierskie na wdrażanie tej koncepcji w związku z kształtowaniem szerokiego spektrum obiektów technicznych oraz ocenianiem ich przez pryzmat zgodności z założeniami GOZ.

Tę niszę założono wypełnić badaniami podjętymi w niniejszej rozprawie. Postanowiono opracować w niej model oceny zgodności podejścia do obiektów technicznych z założeniami koncepcji GOZ, co ujęto w celu głównym rozprawy. Dla potrzeb opisowego ujęcia potencjału obiektów technicznych do spełniania założeń koncepcji GOZ wprowadzono termin cyrkularności, rozumiejąc go jako cechę wskazującą na zdolność do pozostawania w obrocie gospodarczym przy jednoczesnym uwzględnieniu potencjału odpadowości lub statusu odpadu. Założono przy tym, że w rozprawie wprowadzone i zdefiniowane zostaną wskaźniki cyrkularności, które zastosowane zostaną w ocenie obiektów technicznych.

Ze względu na to, że obiekty techniczne mają bardzo różny charakter i wywodzą się z wielu branż i gałęzi przemysłu, postanowiono skupić się na tej, w której szczególnie widoczny jest niedostatek regulacji wpływających na ograniczanie jej negatywnego wpływu na środowisko. W tym kontekście wybrano branżę jachtową, ponieważ jachty są obiektami technicznymi o wysokim poziomie złożoności pod względem różnorodności stosowanych w nich materiałów i funkcji, jakie pełnią znajdujące się w nich podzespoły. Co istotne, jachty po zakończonej eksploatacji stają się odpadami trudnymi do zagospodarowania. Zużyte jednostki pływające często trafiają na nielegalne składowiska, są zatapiane lub porzucane w portach, ponieważ koszt ich utylizacji przewyższa wartość odzyskanych materiałów. W efekcie jachty, które przez lata symbolizują trwałość i wysoką jakość, na końcu cyklu życia stają się problematycznym odpadem.

Argumentem za ukierunkowaniem celu rozprawy na obiekty techniczne branży jachtowej było również to, że ich specyfika odpowiada pod wieloma względami innym środkom transportu. Konieczne jest bowiem uwzględnianie w ich kształtowaniu takich aspektów, jak przykładowo intensywność eksploatacji, ograniczanie stosowania materiałów pierwotnych, minimalizowanie uciążliwości środowiskowej w cyklu życia, zapewnienie zdadności do napraw, przystosowanie do recyklingu itd. Na potrzeby analizowania cyrkularności jachtów w zakresie tego rodzaju aspektów konieczne było również przygotowanie szeregu klasyfikacji umożliwiających praktyczne zastosowanie opracowanego modelu. W pracy zaplanowano dokonanie praktycznej weryfikacji

opracowanego modelu, a także określono warunki, które powinny być spełnione, aby możliwe stało się stosowanie opracowanego modelu do wszystkich rodzajów środków transportu, a nawet wszystkich kategorii obiektów technicznych.

2. ZAGADNIENIA GOSPODARKI O OBIEGU ZAMKNIĘTYM

2.1. Rozwój koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym

Gospodarka o obiegu zamkniętym (określana w niniejszej rozprawie również jako GOZ), nazywana też często ekonomią cyrkularną (z ang. *circular economy*), jest koncepcją, której początki zaczęły się kształtować już w latach 60-tych i 70-tych XX w. w odpowiedzi na rosnącą świadomość ograniczoności zasobów naturalnych oraz skutków negatywnego oddziaływania działalności gospodarczej człowieka na środowisko. Podwaliny tej koncepcji stworzył Boulding w swojej pracy *The Economics of the Coming Spaceship Earth* [8], w której użył metafory Ziemi jako statku kosmicznego będącego przestrzenią o ograniczonych zasobach. Wskazał on, że eksploatacja zasobów naturalnych jest elementem złożonego systemu gospodarczego. Odrzucił jednocześnie możliwość dalszej maksymalizacji zużycia zasobów i postawił to jako warunek rozwoju gospodarczego twierdząc, że gospodarka powinna działać w zamkniętym systemie, gdzie zasoby są efektywnie wykorzystywane a odpady minimalizowane. Jego spostrzeżenia stały się inspiracją dla późniejszych teorii ekonomii przemysłowej i ekonomii cyrkularnej.

W latach 70-tych XX w. został opublikowany raport Klubu Rzymskiego pt. *Granice wzrostu* [61], w którym wykazano, że przy ówczesnym poziomie trendów wzrostowych dotyczących światowej populacji, industrializacji, zanieczyszczenia środowiska, produkcji żywności i zużycia zasobów naturalnych granice rozwoju gospodarczego zostaną osiągnięte w ciągu najbliższych stu lat. Publikacja ta przyczyniła się do przyspieszenia rozwoju ekologii i badań nad wzajemnymi zależnościami między organizmami w ramach różnych ekosystemów. Kontynuowane w ramach tego nurtu badania dostarczały teoretycznych podstaw do rozszerzenia przedmiotu analiz o zależności występujące w systemach przemysłowych. Opierały się one na założeniu, że podobnie jak w ekosystemach, gdzie odpady jednych organizmów stają się zasobami dla innych, systemy przemysłowe mogą funkcjonować w analogiczny sposób – minimalizując odpady i maksymalizując wykorzystanie zasobów w ramach tzw. symbiozy przemysłowej. Badania te stały się początkiem rozwoju ekologii przemysłowej łączącej koncepcję rozwoju gospodarczego z ideą domykania obiegu zasobów w obrębie systemu gospodarczego.

Termin „ekologia przemysłowa” został wprowadzony w literaturze w 1989 roku przez Froscha i Gallopoulosa w artykule *Strategies for Manufacturing* [26] opublikowanym w czasopiśmie *Scientific American*. W artykule tym zaprezentowano ideę systemów przemysłowych inspirowanych procesami biologicznymi w naturze, gdzie odpady jednego procesu mogą stać się surowcami dla innego, co prowadzi do minimalizacji wpływu przemysłu na środowisko. Jako przykład wdrożenia koncepcji symbiozy przemysłowej posłużyć może duńskie miasto Kalundborg. Już w latach 70-tych XX wieku podjęto w nim rozwój współpracy pomiędzy różnymi przedsiębiorstwami, takimi jak elektrownia Asnaes, rafineria Statoil, zakład

farmaceutyczny Novo Nordisk czy farma rybna. Powstała sieć wymiany materiałów i energii, w której produkty uboczne jednej firmy – np. para wodna, gips, popioły czy woda chłodząca – były wykorzystywane jako surowce przez inne podmioty. System ten pozwolił na znaczne ograniczenie emisji zanieczyszczeń i oszczędność zasobów naturalnych, stając się wzorem dla kolejnych inicjatyw przemysłowych na świecie [15]. Kalundborg do dziś uznawane jest za klasyczny przykład funkcjonującego ekosystemu przemysłowego, potwierdzającego tezy Froscha i Gallopoulosa o możliwości organizowania przemysłu na wzór systemów naturalnych.

Kolejny istotny wkład w rozwój koncepcji GOZ wniosły badania zaprezentowane przez Stahela [84]. Zaproponował on koncepcję gospodarki funkcjonalnej, zakładającą maksymalne wykorzystanie wartości przy ograniczonej ilości zasobów materialnych i energii. Według niego środkiem do osiągnięcia zamierzonych celów powinno być wydłużanie cyklu życia produktów oraz przesunięcie nacisku z własności produktów na ich użytkowanie i funkcjonalność.

Jedną z pierwszych znanych z literatury definicji koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym sformułowali Stahel i Reday-Mulvey [85]. Wskazali oni na trzy kluczowe działania: recykling (przekształcenie odpadów w surowce), ponowne wykorzystanie zasobów i regenerację produktów do postaci, w której przywrócono im pierwotną jakość. Wydłużenie cyklu życia produktu uznali za istotny czynnik zmniejszający zużycie zasobów. Ponadto podkreślali znaczenie systemu spiralnego, w obrębie którego minimalizuje się zużycie zasobów, w szczególności materiałów i energii, utrzymując jednocześnie stałe tempo wzrostu gospodarczego oraz postępu społecznego i technicznego [86].

Przełomem w definiowaniu GOZ jako koncepcji, która minimalizuje ilość odpadów i maksymalizuje efektywność wykorzystania zasobów okazała się publikacja Pearce'a i Turner'a [27]. W tej pracy założenia i definicje koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym oparto na następujących aspektach:

- systemie zamkniętych obiegów materiałowych; według autorów gospodarka powinna działać w sposób analogiczny do ekosystemu, gdzie odpady jednego procesu stają się zasobami dla innego; konsekwencją tego postulatu powinno być przekształcenie gospodarki liniowej (wydobywanie – produkcja – odpady) w system cyrkularny (wydobywanie – produkcja – ponowne wykorzystanie),
- podkreśleniu funkcji środowiska; za kluczowe autorzy uznali: podaż zasobów (dostarczanie surowców niezbędnych do produkcji), asymilację odpadów (zdolność środowiska do przyjmowania i przetwarzania odpadów), podtrzymywanie życia (umożliwianie współistnienia systemów ekologicznych i gospodarczych); gospodarka o obiegu zamkniętym powinna mieć na celu ochronę tych funkcji poprzez minimalizację niekorzystnego wpływu gospodarki na środowisko,
- zasadach termodynamiki; pierwsza zasada (zachowanie energii i materii) wskazuje, że wszystko, co jest wprowadzone do gospodarki, musi być ostatecznie ponownie wykorzystane, poddane recyklingowi lub odpowiednio zutylizowane; druga zasada (wzrost entropii) podkreśla natomiast konieczność unikania strat jakości materiałów i energii w procesach gospodarczych;

- minimalizacji odpadów i efektywnym zarządzaniu zasobami; kluczowym celem gospodarki o obiegu zamkniętym jest minimalizacja generowania odpadów na każdym etapie produkcji i konsumpcji, zaś efektywne zarządzanie zasobami oznacza maksymalne wydłużenie cyklu życia produktów i materiałów.

Propozycje Pearce'a i Turnera [72] dostarczyły podstaw teoretycznych dla współczesnego sposobu postrzegania koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Stały się one inspiracją dla wielu innych autorów poruszających problematykę GOZ. Przykładowo Daly [18] stwierdził, że wzrost gospodarczy jest ograniczony przez prawa fizyki, zwłaszcza przez dostępność energii niskiej entropii (przydatnej energii) i zdolność środowiska do przetwarzania odpadów, stąd konieczność tworzenia bardziej zrównoważonych modeli gospodarczych. Stahel [88] stwierdził, że w gospodarce o obiegu zamkniętym opartej na wydajności i trwałości produktów należy zwrócić uwagę na ograniczenia wynikające z zasad termodynamiki w kontekście recyklingu i ponownego wykorzystania materiałów. Inni autorzy (Korhonen, Honkasalo i Seppälä) [45] wskazali natomiast na potrzebę projektowania systemów, które minimalizują entropię poprzez ponowne wykorzystanie materiałów i energii. Uwzględnienie w definiowaniu drugiej zasady dynamiki doprowadziło ich do stwierdzenia, że choć GOZ opiera się na założeniu redukcji entropii, całkowita zamkniętość cykli w gospodarce jest niemożliwa.

Duży wkład w rozwój koncepcji GOZ wnieśli również prace podjęte w latach 90-tych XX wieku przez McDonougha i Braungarta [60]. W przeciwieństwie do tradycyjnego sposobu postrzegania cyklu życia produktów „od kołyski do grobu” ich propozycja koncepcji C2C (*from cradle to cradle*) zakładała, że produkty i materiały mogą być projektowane w sposób umożliwiający niekończący się cykl życia.

Koncepcja C2C zainicjowała podział na dwie kategorie cykli materiałowych, tj:

- cykl biologiczny – obejmujący materiały biodegradowalne, które mogą być zwracane do natury jako bezpieczne składniki,
- cykl techniczny – obejmujący materiały, które mogą być wielokrotnie wykorzystywane w produkcji przemysłowej bez utraty jakości.

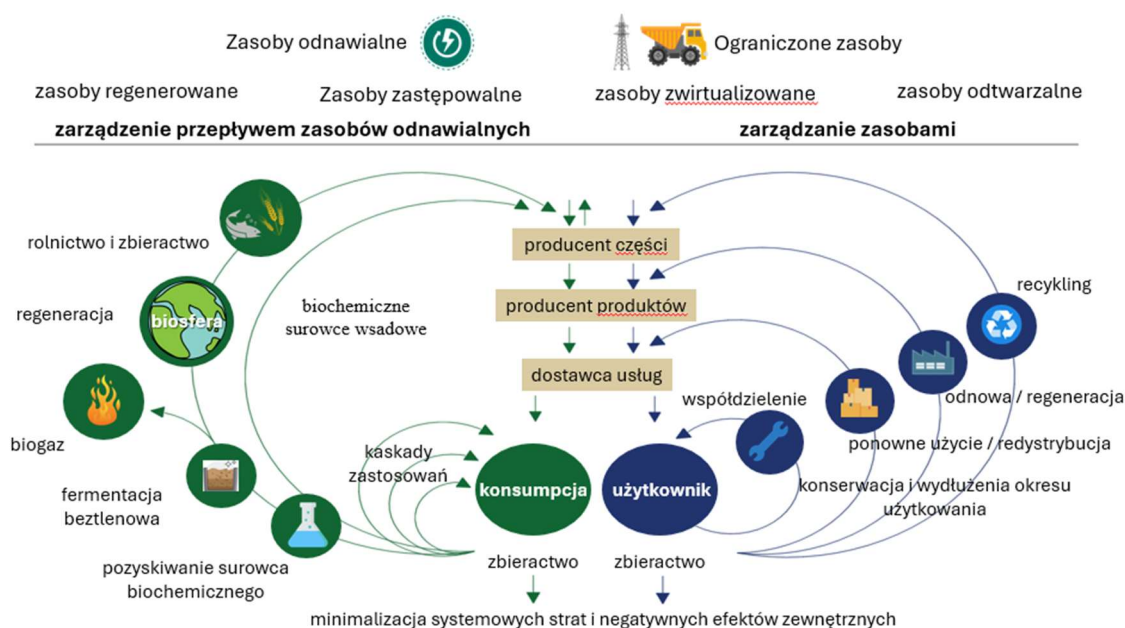
Propozycja McDonougha i Braungarta stanowiła nowatorskie podejście do projektowania i produkcji, inspirowane cyklami natury, które eliminuje pojęcie odpadów poprzez tworzenie produktów zaprojektowanych do nieskończonego obiegu materiałów. Stała się ona z czasem integralną częścią założeń gospodarki o obiegu zamkniętym, dostarczając teoretycznych i praktycznych podstaw do projektowania produktów, systemów produkcyjnych i modeli biznesowych zgodnych z zasadami cyrkularności [1.6].

Z początkiem XXI w. definicje GOZ ewoluowały od koncepcji teoretycznej do kompleksowego modelu gospodarczego. Kluczowe miejsce zyskiwało podejście systemowe, uwzględniające cykl życia produktów, minimalizację strat oraz rozwój technologii i polityk wspierających GOZ. Proponowane nowe definicje obejmowały różne aspekty i wyzwania, takie jak ograniczenia termodynamiczne czy potrzeba transformacji systemów produkcyjnych.

Wśród proponowanych w tym nurcie definicji wyróżniało się spojrzenie Stahela [88], który określił GOZ jako system oparty na maksymalizacji wydajności produktów i

usług poprzez wydłużenie ich cyklu życia przez zapewnienie możliwości napraw, ponowne wykorzystanie, modernizację i recykling. Chodziło mu o zachowanie wartości produktów, materiałów i zasobów tak długo, jak to możliwe.

W roku 2012 fundacja Ellen MacArthur opublikowała raport *Towards the Circular Economy* [S.3] który stał się punktem odniesienia dla wielu działań związanych z GOZ. W raporcie zdefiniowano GOZ jako regeneracyjny system gospodarczy, w którym produkty, materiały i zasoby są wykorzystywane w obiegu zamkniętym tak długo, jak to możliwe, minimalizując powstawanie odpadów. W kolejnych latach definicja gospodarki o obiegu zamkniętym proponowana przez fundację Ellen MacArthur uległa ewolucji do postaci, w której GOZ określany jest jako zamknięty, odtwarzający się i samoregenerujący się system, utrzymujący przez cały czas najwyższą użyteczność i wartość produktów, komponentów i materiałów. Istota tak rozumianego systemu sprowadza się do dwóch rodzajów przepływów materiałowych: technicznego i biologicznego. W cyklu biologicznym zasoby odnawialne są zwracane z powrotem do systemów naturalnych w celu odnowienia ich potencjału. W cyklu technicznym zasoby nieodnawialne są utrzymywane w obiegu poprzez takie procesy, jak ponowne użycie, naprawa, regeneracja i recykling. W obu cyklach te same materiały (zarówno biodegradowalne, jak i niepodlegające biodegradowalności) stają się zasobami w kolejnych cyklach produkcyjnych (rys. 2.1).



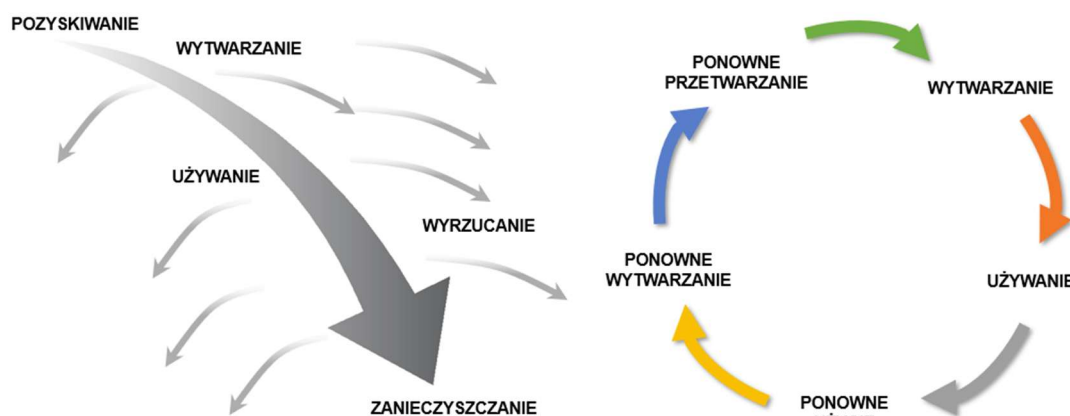
Rys. 2.1. Diagram „motyla” [S.3]

W ciągu ostatnich trzech dekad, istotny wpływ na sposób definiowania koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym wywarły doświadczenia z prób jej praktycznego wdrażania do systemów gospodarczych. Najwięcej w tym zakresie zrobiono w Chinach, gdzie w ostatniej dekadzie XX wieku wskaźnik materiałochłonności gospodarki wzrósł aż 4-krotnie. Bazując na chińskich doświadczeniach zaczęto określać koncepcję gospodarki o obiegu zamkniętym jako strategię rozwoju, której celem jest jednoczesna

maksymalizacja efektywności wykorzystania zasobów i minimalizacja produkcji odpadów w gospodarce [34].

Zainteresowania naukowców i ekonomistów zaczęły koncentrować się na wymiarze praktycznym GOZ i dostosowywaniu prawodawstwa i instrumentów ekonomicznych do postaci, która będzie stymulować wdrażanie GOZ w systemach gospodarczych poszczególnych krajów. Obecnie w ujęciu praktycznym koncepcję gospodarki o obiegu zamkniętym traktuje się jako strategię rozwoju umożliwiającą wzrost gospodarczy przy jednoczesnej optymalizacji zużycia zasobów i minimalizacji odpadów [47]. Stosowane w praktyce definicje wskazują na wpisanie w założenia GOZ nie tylko konieczności recyklingu, ale również projektowania produktów z myślą o ich długowieczności, modułowości oraz łatwości naprawy i demontażu.

Podsumowując analizę rozwoju definicji koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym można zauważyć, że gospodarka cyrkularna stała się naturalną następczą tradycyjnego modelu gospodarki linearnej opartej na założeniu weź-wyprodukuj-wyrzuć (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Różnice między gospodarką linearną a cyrkularną [S.3]

Do początku XXI wieku koncepcja gospodarki o obiegu zamkniętym była uważana jako sposób realizacji celów idei zrównoważonego rozwoju czy ekologii przemysłowej. W ciągu ostatnich dwudziestu lat koncepcja ta traktowana jest w sposób wyodrębniony jako jedna z kluczowych odpowiedzi na potrzeby gospodarcze współczesnego świata. Z perspektywy systemów gospodarczych koncepcja gospodarki o obiegu zamkniętym jest ukierunkowaniem na bardziej efektywne wykorzystanie zasobów, które jako surowce, materiały i produkty powinny pozostawać w obiegu tak długo jak to jest możliwe, zaś wytwarzanie odpadów i zużycie energii powinno zostać ograniczane do możliwie najniższego poziomu.

2.2. Sposoby wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym

Jak wynika z informacji przedstawionych w rozdziale 2.1 niniejszej rozprawy, definicje koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym mają charakter dość ogólny. Do jej

wdrażania w praktyce gospodarczej potrzebne są pewne wytyczne, które ukierunkowują na podejmowanie konkretnych działań – zarówno na poziomie politycznym, poziomie podmiotów gospodarczych, jak i wśród inżynierów rozwiązujących podstawowe problemy decyzyjne. Tego typu wytycznych doszukiwać się można m.in. w zasadach R (zwanych też strategiami R), które w literaturze przyjmują różną postać i mają różny poziom szczegółowości. Zasady te wskazują na działania, których podejmowanie jest zbieżne z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym i zapewnia wzrost poziomu cyrkularności wszelkich produktów.

Podobnie jak definiowanie koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym, tak i strategię R rozwijały się w sposób ewolucyjny. Początkowo w literaturze proponowano strategię 3R, w których koncentrowano się na trzech aspektach: *Reduce*, *Reuse*, *Recycle*. Obejmowały one działania na rzecz redukcji odpadów, ponownego wykorzystania materiałów i ich recyklingu, przy czym zakładały analizowanie każdego produktu lub procesu przez pryzmat całego ich cyklu życia [S.3].

Doświadczenia praktyczne ze stosowania zasad 3R oraz rozwój koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym doprowadziły do tego, że poza aspektami ujętymi w ramach zasad 3R zaczęto postulować dodatkowe działania związane z odzyskiwaniem energii lub innych wartościowych zasobów z odpadów, które nie mogą być ponownie użyte lub przetworzone [29]. W ten sposób powstały zasady 4R, które w szerszym wymiarze obejmują zarówno działania zapobiegające powstawaniu odpadów, jak i te które mają na celu efektywne nimi zarządzanie, gdy już powstaną. Zasady 4R zostały włączone do wielu polityk środowiskowych na poziomie krajowym i europejskim. Stanowią integralną część ramowej dyrektywy w sprawie odpadów, która nakłada obowiązek stosowania hierarchii odpadów, począwszy od zapobiegania powstawaniu odpadów, przez przygotowanie do ponownego użycia, recykling, odzysk, aż po unieszkodliwianie [N.4].

W miarę rozwoju koncepcji GOZ zasady 4R zostały rozszerzone o kolejne postulowane działania mające na celu zwiększenie cyrkularności zasobów w obiegu gospodarczym. Odzwierciedlają to dwie propozycje:

- zasady 6R, w których dodatkowymi zasadami są *Repurpose* i *Remanufacture* [69],
- zasady 10R, w których dodatkowymi zasadami (ponad tymi, które ujęto w koncepcji 6R) są *Refuse*, *Rethink*, *Repair*, *Refurbish* [S.3].

Podobnie, jak w przypadku innych koncepcji formułowania strategii R, tak i w przypadku zasad 10R, wdrażanie GOZ obejmuje cały cykl życia produktów, od projektowania, przez produkcję i konsumpcję, aż po recykling i odzyskiwanie zasobów. Każda ze strategii 10R wskazuje na konkretne działania, których podejmowanie na różnych etapach cyklu życia produktu zwiększa jego cyrkularność. Kolejne zasady wyszczególnione w koncepcji 10R oznaczają:

- R0 – *Refuse* (Rezygnuj) – zasada polega na rezygnacji z zastosowania w koncepcji produktu materiałów pierwotnych, materiałów niebezpiecznych i materiałów zbędnych; zasada jest w pełni spełniona, gdy udaje się osiągnąć całkowicie „dematerializację” produktu rozumianą jako uznanie produktu za zbędny i/lub przekształcenie go w proces, np. w usługę,

- R1 – *Rethink* (Przemyśl) – zasada polega na tworzeniu nowych koncepcji projektowania, produkcji i konsumpcji produktu w celu zwiększenia efektywności jego wykorzystania,
- R2 – *Reduce* (Redukuj) – zasada polega na dążeniu do zmniejszenia zużycia zasobów na każdym etapie cyklu życia produktu lub realizacji określonego procesu,
- R3 – *Reuse* (Ponownie używaj) – zasada polega na wydłużaniu cyklu życia produktu przez wykorzystanie jego komponentów lub materiałów więcej niż jeden raz, bez konieczności ich przetwarzania,
- R4 – *Repair* (Naprawiaj) – zasada polega na wydłużaniu cyklu życia produktu poprzez przywracanie go do używalności (lub też przywracanie funkcji produktu) w wyniku procesów naprawy,
- R5 – *Refurbish* (Odnawiaj) – zasada polega na wydłużaniu cyklu życia produktu poprzez przywracanie produktu do używalności przy zapewnieniu możliwości przywrócenia lub wręcz rozszerzenia jego funkcjonalności,
- R6 – *Remanufacture* (Odbudowuj) – zasada polega na wydłużeniu cyklu życia produktu poprzez przywracanie go do używalności przez odtworzenie w pełni fabrycznych funkcji produktu (doprowadzenie produktu do stanu zbliżonego do produktu nowego),
- R7 – *Repurpose* (Przeznaczaj do innych celów) – zasada polega na wydłużeniu cyklu życia produktu poprzez przywrócenie produktu do używalności przy równoczesnej zmianie funkcji, jaką produkt ma spełniać,
- R8 – *Recycle* (Recyrkuluj) – zasada polega na ograniczeniu ilości odpadów generowanych w cyklu życia produktu przez przetwarzanie ich (odpadów) w surowce wtórne, które mogą być ponownie użyte w produkcji nowych wyrobów,
- R9 – *Recover* (Odzyskuj wartości) – zasada polega na wykorzystaniu tych odpadów generowanych w cyklu życia produktu, które nie mogą zostać wykorzystane w cyklu życia innych produktów w sposób zapewniający odzyskanie z nich innych wartości (np. pozyskanie energii w procesie spalania).

Strategie 10R, stosowane w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), są różnie definiowane w literaturze naukowej w zależności od kontekstu zastosowania. Wiele źródeł przedstawia 10R jako hierarchię działań mających na celu maksymalizację wartości zasobów i minimalizację odpadów, ale szczegóły definicji różnią się w zależności od podejścia autorów. Wybrane sposoby interpretacji poszczególnych strategii przedstawiono w ciągu dalszym niniejszego rozdziału rozprawy.

R0 – Refuse

Strategia *Refuse* jako pierwszy poziom w hierarchii działań ukierunkowanych na wdrażanie GOZ definiowana jest jako eliminowanie produktu jako takiego, gdy jego funkcja może zostać zastąpiona przez inny produkt lub w inny, niematerialny sposób (np. przez skorzystanie z usługi). Przykładowe definicje tej strategii mówią, że *Refuse* to:

- uczynienie produktu zbędnym poprzez rezygnację z jego funkcji lub zastąpienie tej funkcji w sposób radykalnie odmienny za pomocą innego produktu [74],

- unikanie użycia określonych materiałów lub produktów, prowadzące do redukcji zużycia zasobów i wyeliminowania odpadów oraz ograniczenia wpływu na środowisko [93],
- świadoma decyzja o unikaniu produktów i usług, które generują odpady lub mają znaczący negatywny wpływ na środowisko [28],
- odrzucenie produktów, które nie są przyjazne dla środowiska lub są zbędne, zapobiegając w ten sposób powstawaniu odpadów u źródła [93].

R1 – Rethink

Strategia *Rethink* polega na tworzeniu bardziej efektywnych produktów głównie w kontekście dostarczanej przez nie funkcjonalności oraz sposobu ich użytkowania. Prowadzi do maksymalizacji intensywności wykorzystania produktu i ograniczenia skali produkcji, a tym samym do ograniczenia ilości odpadów oraz minimalizacji zużycia zasobów naturalnych. Zgodnie z wybranymi definicjami *Rethink* to ponowne przemyślenie ukierunkowane na:

- intensyfikację użytkowania produktu poprzez dzielenie się nim między wieloma użytkownikami lub zwiększenie jego współczynnika wykorzystania [74],
- opracowywanie nowych sposobów dostarczania funkcjonalności klientom poprzez zmianę projektowania produktów i modeli biznesowych w celu zmniejszenia zużycia zasobów [66],
- przejście od własności produktu do dostępu do produktu, co zachęca do wspólnego użytkowania i współdzielonej konsumpcji przy jednoczesnej maksymalizacji wykorzystania produktu [7],
- zachęcenie do przeprojektowania produktów i systemów w celu zminimalizowania zużycia zasobów oraz wpływu na środowisko w całym cyklu życia [7],
- kwestionowanie obecnych wzorców konsumpcji oraz rozważanie alternatywnych rozwiązań, które zaspokoją potrzeby przy mniejszym zużyciu zasobów [66].

R2 – Reduce

Strategia *Reduce* prowadzi do zmniejszenia zużycia zasobów i minimalizacji ilości generowanych odpadów, koncentrując się nie tyle na samym produkcie, co procesach związanych z jego cyklem życia, a szczególnie z jego wytwarzaniem i użytkowaniem. Mimo, że strategia ta nie koncentruje się bezpośrednio na produkcie w ujęciu technicznym, to przykładowo redukcja masy produktu jest jej istotnym aspektem. W definicjach strategii *Reduce* podkreśla się, że polega ona na:

- zwiększaniu efektywności produkcji lub użytkowania produktów poprzez zużywanie mniejszej ilości zasobów i materiałów [74],
- używaniu mniejszej ilości zasobów w produkcji i konsumpcji w celu zmniejszenia ilości odpadów i wpływu na środowisko [30],
- minimalizowaniu zużycia zasobów i generowania odpadów przez zwiększanie efektywności oraz przyjęcie zrównoważonych wzorców konsumpcji i produkcji [29],

- zmniejszeniu ilości materiałów i energii wykorzystywanych w produkcji i konsumpcji, aby obniżyć wpływ na środowisko [29],
- minimalizowaniu generowania odpadów poprzez ograniczenie zużycia zasobów i optymalizację procesów w celu zwiększenia efektywności [39].

R3 – Reuse

Strategia *Reuse* w gospodarce cyrkularnej polega na zapewnieniu możliwości ponownego wykorzystywania produktów lub ich komponentów. Tym samym prowadzi ona do przedłużenia żywotności produktu lub jego komponentu, przyczyniając się do zmniejszenia zapotrzebowania na nowe produkty, co w efekcie ogranicza zużycie zasobów oraz minimalizuje ilość powstających odpadów. Strategia *Reuse* w znanych definicjach rozumiana jest jako:

- wielokrotne wykorzystanie produktu (lub jego komponentów) zgodnie z pierwotnym przeznaczeniem, bez znaczących modyfikacji [74],
- wykorzystanie przedmiotu po raz kolejny po jego użyciu, zarówno w tej samej funkcji, jak i w innej, bez znaczących zmian [39],
- działanie lub praktyka polegająca na wykorzystywaniu przedmiotu, czy to zgodnie z jego pierwotnym przeznaczeniem (konwencjonalne ponowne użycie), czy też w innej funkcji (ponowne użycie przy zmianie przeznaczenia), co pomaga przedłużyć cykl życia produktu i zmniejszyć ilość odpadów [29],
- wielokrotne korzystanie z produktu lub jego komponentów w tej samej funkcji, do której pierwotnie został zaprojektowany, wydłużając jego cykl życia [87],
- wielokrotne wykorzystanie przedmiotów lub komponentów bez istotnych zmian, co opóźnia ich wejście do strumienia odpadów [23].

R4 – Repair

Strategia *Repair* polega na naprawianiu i konserwacji uszkodzonych produktów w celu przywrócenia ich stanu do takiego, który zapewnia możliwość pełnienia pierwotnej funkcji. Konsekwencją podejmowanych w ten sposób działań jest wydłużenie cyklu życia produktu, a tym samym ograniczanie zapotrzebowania na nowe produkty. W efekcie tego ograniczane jest zapotrzebowanie na zasoby niezbędne do wytworzenia nowych produktów oraz znacząco opóźnia się i ogranicza generowanie odpadów. W myśl wybranych definicji strategia *Repair* rozumiana jest jako:

- proces przywracania produktu do dobrego stanu roboczego poprzez wymianę lub naprawę komponentów, które uległy awarii lub są bliskie uszkodzenia [88],
- proces obejmujący korektę określonych wad w produkcie w celu przywrócenia jego zamierzonej funkcjonalności [13],
- naprawianie i konserwowanie uszkodzonych produktów w celu przedłużenia procesu ich użytkowania w zakresie pełnionej pierwotnej funkcji [74],
- przywracanie wadliwego lub uszkodzonego produktu do stanu używalności, co wydłuża jego życie i opóźnia konieczność wymiany [7].

R5 – Refurbish

Realizacja strategii *Refurbish* polega na przywróceniu utraconej funkcjonalności oraz wartości użytkowej i rynkowej produktu przez jego odnowienie w sposób zapewniający zachowanie poziomu satysfakcji użytkownika. Zakłada ona możliwość dodatkowej aktualizacji cech produktu zgodnie z obowiązującymi normami i aktualnymi standardami. Strategia ta pozwala na przywracanie produktów do zadowalającego stanu technicznego i estetycznego, umożliwiając ich dalsze użytkowanie. Dzięki niej produkty zostają dłużej w obiegu, przez co zmniejsza się popyt na nowe produkty oraz mniejsze jest zapotrzebowanie na zasoby. Strategię *Refurbish* definiuje się m.in. jako:

- proces realizacji prac wykonywanych na używanej części lub na produkcie, aby uczynić go funkcjonalnym i estetycznie akceptowalnym, choć niekoniecznie tożsamym ze stanem nowego produktu [37],
- przywrócenie używanych produktów do zadowalającego stanu technicznego poprzez naprawę lub wymianę komponentów, często z uwzględnieniem ulepszeń w celu poprawy ich wydajności [50],
- proces przywracania używanego produktu do zadowalającego stanu technicznego poprzez renowację i aktualizację jego komponentów tak, aby spełniały obecne standardy i wymagania [89].

R6 – Remanufacture

Strategia *Remanufacture* polega na przywracaniu utraconej funkcjonalności produktu przez jego kompleksową odbudowę prowadzącą do stanu porównywalnego z nowym, zarówno pod względem funkcjonalnym, jak i estetycznym. Strategia ta sprawia, że używane produkty są przywracane do stanu fabrycznego oraz odzyskują swoje pierwotne właściwości funkcjonalne i estetyczne. Pozwala ona często dwukrotnie wydłużyć czas użytkowania i w naturalny sposób prowadzi do zmniejszenia zapotrzebowania na nowe produkty, zapewniając minimalizację zapotrzebowania na zasoby i ograniczając ilość odpadów. Zgodnie z wybranymi definicjami strategia *Remanufacture*:

- to proces przywracania używanych produktów do stanu porównywalnego z nowym poprzez odbudowę i wymianę komponentów [36],
- odnosi się do przemysłowego procesu, w którym zużyte lub uszkodzone produkty są przekształcane w nowe produkty [59],
- to proces przywracania używanego produktu do stanu, jaki cechuje produkty nowe poprzez wymianę i odbudowę jego komponentów [38].

R7 – Repurpose

Strategia *Repurpose* polega na przywracaniu produktów lub ich części do użytku, poprzez ich adaptację do nowych funkcji. W tej strategii produkty (lub ich części), które zakończyły swój pierwotny cykl życia zamiast stać się odpadem zostają przywrócone do użytku pełniąc inne funkcje. Innymi słowy przez zmianę funkcji produktu lub jego części ulega wydłużeniu cykl życia (odpowiednio produktu lub części), zwiększa się efektywność wykorzystania zasobów oraz ogranicza ilość generowanych odpadów. Wybrane definicje strategii *Repurpose* mówią, że polega ona na:

- zmianie przeznaczenia przez twórcze przeprojektowanie produktów lub ich komponentów, aby mogły służyć do celów innych niż pierwotnie je zaprojektowano [90],
- ponownym wykorzystaniu produktu lub jego komponentów do realizacji innej funkcji niż pierwotnie zamierzona, co pozwala na wydłużenie jego cyklu życia i zmniejszenie ilości odpadów [82],
- praktyce wykorzystywania produktu lub materiału do realizacji funkcji innej niż jego pierwotne przeznaczenie, co przyczynia się do wzrostu efektywności wykorzystania zasobów [7].

R8 – Recycle

Istotą strategii *Recycle* jest odzyskiwanie materiałów z produktów, które osiągnęły koniec swojego cyklu życia, a następnie ich przetwarzanie w celu ponownego wykorzystania w procesach produkcyjnych. Wykorzystanie materiałów ze zużytych produktów (odpadów) jako surowców wtórnych w produkcji prowadzi do zmniejszenia zużycia surowców pierwotnych, ogranicza ilość odpadów oraz stanowi zamknięcie pętli obiegu materiałów. Strategia *Recycle* definiowana jest na wiele różnych sposobów. Wybrane definicje mówią, że jest to proces:

- zbierania i przetwarzania materiałów, które w innym przypadku zostałyby wyrzucone jako odpady oraz przekształcania ich w nowe produkty, co pozwala na oszczędność zasobów i zmniejszenie wpływu na środowisko [39],
- ponownego przetwarzania materiałów odpadowych na surowce lub produkty, co wydłuża ich cykl życia [102],
- ponownego przetwarzania materiałów odpadowych na nowe produkty w celu zapobieżenia marnowaniu potencjalnie użytecznych materiałów, zmniejszenia zużycia świeżych surowców oraz ograniczenia zużycia energii i zanieczyszczenia środowiska [29].

R9 – Recover

Strategia *Recover* polega na odzyskiwaniu energii lub materiałów z odpadów, które nie nadają się do ponownego użycia ani recyklingu. Jako ostatnia w hierarchii, strategia ta koncentruje się na ostatecznym domknięciu obiegu produktu, który jako odpad ostatecznie zakończył już swój cykl życia i nie może zostać ponownie użyty ani poddany recyklingowi. Domknięcie obiegu polega na całkowitej utylizacji odpadu głównie w postaci spalania z odzyskiem energii, która jako końcowa wartość produktu zostaje „zapętłona” w obiegu, zaś odpad przekształca się w użyteczne formy energii lub surowce. Zgodnie z wybranymi definicjami strategię *Recover* definiuje się jako:

- ekstrakcję materiałów lub energii z odpadów za pomocą procesów termicznych, biologicznych lub chemicznych, gdy ponowne użycie lub recykling nie są możliwe do zastosowania [29],
- proces odzyskiwania energii lub materiałów z odpadów, które nie mogą być ponownie użyte ani poddane recyklingowi, zazwyczaj za pomocą metod takich jak spalanie z odzyskiem energii lub fermentacja beztlenowa [39],

- proces pozyskiwania energii lub surowców wtórnych z odpadów, które nie nadają się do bezpośredniego ponownego użycia ani recyklingu, co pozwala na zmniejszenie zapotrzebowania na surowce pierwotne [95].

Wdrażanie koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym w oparciu o wykorzystanie zasad 10R może odbywać się poprzez realizację zarówno jednej, jak i jednocześnie wszystkich strategii. Strategie zestawione w zasadach 10R można podzielić na trzy następujące grupy:

- *Refuse, Rethink, Reduce* – strategie, które mają zastosowanie w fazie konceptualizacji i projektowania produktu, a efektem ich stosowania jest skrócenie pętli obiegu produktów i materiałów,
- *Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose* – strategie, które odnoszą się do fazy użytkowania produktów; efektem ich stosowania są średniej długości pętle obiegu produktów i materiałów,
- *Recycle, Recover* – strategie, które mają zastosowanie w końcowej fazie cyklu życia produktu, kiedy produkt traci swoją wartość użytkową; ich stosowanie odpowiada występowaniu najdłuższych pętli obiegu produktów i materiałów [39].

Zagadnienia te w formie syntetycznej prezentuje rysunek 2.3.



Rys. 2.3. Strategie cyrkularne zgodnie z zasadą 10R według stopnia cyrkularności [39]

Poza wymienionymi w niniejszym rozdziale sposobami ujęcia zasad R (3R, 4R, 6R i 10R) w literaturze występują jeszcze inne sposoby wskazywania działań zalecanych do podejmowania, aby osiągnąć cele zgodne z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym. Wiele z nich wpisanych jest w dokumenty systematyzujące i promujące działania na rzecz odejścia od dotychczasowego paradygmatu gospodarki linearnej do nowego wzorca gospodarki cyrkularnej. Są to przykładowo:

- Rozporządzenie (WE) nr 66/2010 z dnia 25 listopada 2009 r. w sprawie oznakowania ekologicznego UE [N.21],
- Rozporządzenie (WE) nr 1221/2009 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 listopada 2009 r. w sprawie dobrowolnego uczestnictwa organizacji we wspólnotowym systemie ek zarządzania i audytu (EMAS), [N.20],
- Dyrektywa 2008/98/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy [N.4],
- Decyzja 1386/2013/UE z dnia 20 listopada 2013 r. w sprawie ogólnego unijnego programu działań w zakresie środowiska do 2020 r. [N.3],
- Zalecenie 2013/179/UE z dnia 9 kwietnia 2013 r. w sprawie stosowania wspólnych metod pomiaru efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów i organizacji oraz informowania o niej (L 124 4.05.2013) [N.26],
- Komunikat COM(2001) 274 z dnia 4 lipca 2001 r. w sprawie wykładni przepisów prawa wspólnotowego dotyczących zamówień publicznych i możliwości uwzględniania aspektów środowiskowych w zamówieniach publicznych [S.7],
- Komunikat COM(2003) 302 z dnia 18 czerwca 2003 r. – Zintegrowana Polityka Produktowa – budowanie podejścia środowiskowego opartego na analizie cyklu życia [S.10],
- Komunikat COM(2008) 397 z dnia 16 lipca 2008 r. – Plan działania na rzecz zrównoważonej konsumpcji i produkcji oraz zrównoważonej polityki przemysłowej [S.8],
- Komunikat COM(2013) 249 z dnia 6 maja 2013 r. – Zielona infrastruktura – zwiększanie kapitału naturalnego Europy [S.9].

Pewne wytyczne dotyczące ukierunkowania na stosowanie GOZ w Polsce zdefiniowano w Mapie drogowej transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym [S.13]. Zapisano tam m.in., że GOZ jest koncepcją, w której wartość produktów, materiałów oraz surowców powinna pozostawać w obiegu tak długo, jak jest to możliwe, a wytwarzanie odpadów powinno być jak najbardziej zminimalizowane.

W 2017 r. British Standards Institution wydał pierwszą normę dotyczącą GOZ, BS 8001:2017 – Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations [N.1]. Jej celem jest pomoc organizacjom i konsumentom we wdrażaniu zasad GOZ i zrównoważonego rozwoju w zakresie dostarczania „cyrkularnych” produktów i usług, zasad produkcji, przekształcenia modeli biznesowych, tak aby GOZ mógł stać się codzienną praktyką gospodarczą. W 2019 r. powstał także Podkomitet Techniczny ISO/TC 323 Circular economy, który pracował nad wypracowaniem wymogów, ram i wytycznych, a także narzędzi wspierania GOZ [N.13].

W 2024 roku opublikowano serię norm ISO 59000 dotyczącą gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), w tym m.in.:

- ISO 59004:2024 (terminologia i zasady) [N.9],
- ISO 59010:2024 (modele biznesowe i łańcuchy wartości) [N.10],
- ISO 59020:2024 (metryki i ocena cyrkularności) [N.11].

Normy te stanowią pierwsze globalne, spójne ramy oceny wdrażania działań zgodnych z zasadami GOZ. Ich celem jest ujednolicenie pojęć, wytyczenie kierunków

transformacji oraz dostarczenie wskaźników umożliwiających porównywalny pomiar efektywności GOZ.

2.3. Metody stosowane w mierzeniu efektów wprowadzania gospodarki o obiegu zamkniętym

2.3.1. Analiza przepływów materiałowych MFA

Spośród zidentyfikowanych metod mogących służyć do oceny oddziaływań środowiskowych, które są stosowane w kontekście GOZ w pierwszej kolejności wskazać można na analizę przepływów materiałowych (*Material Flow Analysis* – MFA). Metoda MFA jest ilościową analizą przepływu surowców, materiałów i produktów w obrębie określonego systemu gospodarczego, produkcyjnego lub na terenie określonego regionu. Pozwala na oszacowanie ilości materiałów wchodzących do systemu, przetwarzanych wewnątrz niego oraz opuszczających go w postaci produktów końcowych, odpadów i emisji [11, 42]. MFA pozwala na ocenę aspektów mających bezpośredni wpływ na cyrkularność produktu tj. wydajność materiałową (relacja między surowcami a produktem końcowym) czy zamknięcie pętli materiałowych (określenie udziału ilości odpadów powracających do obiegu i trafiających na składowiska) [1]. Jest też wykorzystywana do oceny śladu materiałowego produktów jako element procesów ekoprojektowania i tworzenia cyfrowych paszportów produktów (DPP) [12, S.13].

Z perspektywy tematyki niniejszej rozprawy istotne jest to, że metoda MFA może stanowić podstawę budowy wskaźników oceny cyrkularności, które pozwalają w sposób ilościowy ocenić stopień wdrożenia GOZ. Przykładem takiego zastosowania jest propozycja Haasa i in. [31], gdzie dokonano ilościowej oceny cyrkularności materiałowej gospodarki, opartej na analizie przepływów materiałowych. Swoje obliczenia autorzy oparli na dwóch kluczowych składowych:

- RCM (*Recycled and Circular Material Use*) – ilości materiałów pochodzących z recyklingu oraz innych źródeł cyrkularnych (np. kompostowanie, ponowne użycie),
- DMI (*Direct Material Input*) – bezpośrednim zużyciu materiałów w gospodarce, czyli sumie wszystkich materiałów pierwotnych i wtórnych wprowadzanych do systemu gospodarczego.

Na podstawie proporcji RCM/DMI Hass i współautorzy dokonali ilościowego oszacowania udziału materiałów cyrkularnych w ogólnym zużyciu materiałowym. W ten sposób obliczyli, jak duża część materiałów w gospodarce globalnej oraz na terenie Unii Europejskiej w roku 2005 pochodziła z obiegu zamkniętego, a jak duża oparta była na surowcach pierwotnych. Zgodnie z wynikami badania Haasa i współautorów [31] w 2005 roku jedynie około 6% materiałów zużywanych w gospodarce (UE-27) pochodziło z obiegu zamkniętego, tj. stanowiło materiały wtórne pochodzące z recyklingu lub ponownego wykorzystania. Tym samym aż 94% całkowitego zużycia materiałowego opierało się na zasobach pierwotnych lub prowadziło do powstawania odpadów, które nie zostały ponownie wprowadzone do obiegu gospodarczego.

Można zatem stwierdzić, że Haas i współautorzy [31] nie opracowali nowego wskaźnika oceny cyrkularności, ale ukształtowali fundamenty rozwoju wskaźników cyrkularności opartych na metodzie MFA. Tworząc ilościowy obraz globalnej gospodarki z perspektywy gospodarki o obiegu zamkniętym, w swojej propozycji wykorzystali dane dotyczące m.in.:

- wydobycia surowców pierwotnych – *Domestic Extraction (DE)*,
- wymiany handlowej materiałów – *Imports/Exports*,
- odpadów, emisji i strat materiałowych – *Domestic Processed Output (DPO)*,
- strumieni materiałów powracających do obiegu – *Recycled and Reused Flows*.

Metodę MFA w swoich badaniach nad zagadnieniami cyrkularności gospodarki wykorzystał również Geng [27]. Wraz z zespołem współpracowników opracował zestaw operacyjnych wskaźników służących do monitorowania i zarządzania transformacją w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym na poziomie miast, regionów oraz parków przemysłowych. Wśród najważniejszych wskaźników zaproponowanych przez Genga znalazły się m.in.:

- zużycie surowców pierwotnych przypadające na jednostkę produktu krajowego brutto (*Resource Consumption per Unit GDP*),
- udział materiałów i energii odzyskiwanych w całkowitym zużyciu zasobów (*Comprehensive Resource Utilization Rate*),
- procent przemysłowych odpadów stałych poddawanych recyklingowi (*Recycling Rate of Industrial Solid Waste*),
- energochłonność produkcji przemysłowej (*Energy Consumption per Unit of Industrial Output*),
- udział wody poddanej recyklingowi w całkowitym zużyciu wody (*Water Recycling Rate*),
- stopień zagospodarowania produktów ubocznych w ramach systemu przemysłowego (*Rate of By-product Utilization*).

Proponowane wskaźniki zostały wdrożone pilotażowo w ramach tzw. ekologicznych parków przemysłowych (*Eco-Industrial Parks*), m.in. w Dalian (prowincja Liaoning), Kalundborg Industrial Symbiosis (Dania), Guangxi Eco-Industrial Park i Suzhou Industrial Park (Chiny). Celem wdrożeń było nie tylko bieżące monitorowanie postępów we wdrażaniu zasad GOZ, ale również identyfikowanie dobrych praktyk i barier transformacji w kierunku zrównoważonego modelu gospodarowania. Uznaje się, że osiągnięte wyniki przyczyniły się do rozwoju krajowej strategii GOZ w Chinach, stanowiąc podstawę do formułowania polityk wspierających obiegu zamknięte w przemyśle i gospodarce regionalnej [27].

W literaturze znaleźć można jeszcze inne przykłady wskaźników cyrkularności, w których wykorzystuje się metodę MFA. Koncentrują się one wyłącznie na ocenie ilościowych aspektów przepływu surowców i materiałów, traktując je jako masowe strumienie, niezależnie od ich charakterystyki środowiskowej czy funkcjonalnej. Nie ma jednak możliwości ich wykorzystania w odniesieniu do konkretnego produktu technicznego. Wskaźniki te nie uwzględniają bowiem wartości użytkowej produktu, jego cyklu życia, trwałości, możliwości demontażu czy regeneracji. Można więc stwierdzić, że metoda MFA, jak i oparte na niej wskaźniki, choć przydatne w ocenie cyrkularności

systemu gospodarczego jako całości, nie dają pełnego obrazu cyrkularności konkretnego produktu, a szczególnie obiektu technicznego.

2.3.2. Wskaźnik MCI

Wskaźnik cyrkularności materiałowej (MCI – *Material Circularity Index*) pozwala ocenić, na ile materiały wykorzystane w produkcji pochodzą z obiegu zamkniętego i do tego obiegu mogą wrócić. MCI w odróżnieniu od wskaźników opartych na MFA, analizuje przepływ materiałów w kontekście produktu, pozwalając dokonać oceny stopnia jego cyrkularności. Wskaźnik MCI został opracowany przez Ellen MacArthur Foundation we współpracy z Granta Design, aby mierzyć cykliczność przepływu materiałów z perspektywy cyklu życia produktów [S.1].

Metoda obliczania wskaźnika MCI opiera się na analizie dwóch kluczowych aspektów przepływu materiałów:

- wejść materiałowych – określane jest ile materiału pochodzi z nowych, pierwotnych surowców (*V – virgin material*); wysoka wartość *V* oznacza, że produkt powstał w dużym stopniu z zasobów pierwotnych, co negatywnie wpływa na jego cyrkularność,
- wyjść materiałowych – określane jest ile materiału nie wraca do obiegu po zakończeniu użytkowania, tylko trafia do odpadu (*W – waste not recovered*); im większa ilość materiału niezdatnego do recyklingu, tym niższy poziom cyrkularności.

Metoda wyliczania wskaźnika MCI skupia się na przepływie materiałowym i czasie użytkowania, a także uwzględnia modułowość i możliwość ponownego użycia. MCI można określać dla pojedynczego produktu, grupy produktów lub całej firmy. Na jego podstawie wyliczany jest wskaźnik liniowości przepływu materiałów – LFI (zależność 2.1).

$$LFI = \frac{V+W}{2M} \quad (2.1)$$

gdzie:

V – masa materiałów pierwotnych użytych w produkcji (*virgin input*),

W – masa materiału, który nie został odzyskany po zużyciu (*waste not recovered*),

M – masa produktu.

Wskaźnik ten pokazuje, jaka część materiałów w cyklu życia produktu pochodzi z nieliniowego przepływu, czyli z pierwotnych surowców oraz z materiałów, które nie zostały odzyskane po zużyciu. Wskaźnik LFI, po uwzględnieniu korekty związanej z trwałością produktu (premiowane są produkty trwalsze niż średnia rynkowa – takie, które rzadziej wymagają wymiany i generują tym samym mniej odpadów), pozwala obliczyć końcową wartość MCI, która mieści się w przedziale od 0 (model całkowicie liniowy) do 1 (pełna cyrkularność materiałowa). Wynika to z zależności opisującej sposób wyliczenia wskaźnika MCI (zależność 2.2) [S.1].

$$MCI = 1 - \frac{V+W}{2M} \times \frac{L_{vag}}{L} \quad (2.2)$$

gdzie:

L – faktyczna żywotność produktu,

L_{vag} – średnia żywotność produktu w danej kategorii rynkowej [S.6].

Wskaźnik MCI uwzględnia znacznie więcej aspektów niż tylko przepływy materiałów, jak jest to w metodzie MFA. Jest w nim bowiem brane pod uwagę również pochodzenie materiałów, ich potencjał odzysku po zakończeniu użytkowania produktu oraz trwałość produktu. MCI określa zatem stopień cyrkularności materiałowej produktu, rozumiany jako poziom zamknięcia obiegu materiałów w cyklu życia produktu. Pozwala na ilościową ocenę, w jakim zakresie dany produkt został zaprojektowany w zgodzie z zasadami obiegu zamkniętego w ujęciu materiałowym, uwzględniając wykorzystanie surowców wtórnych i odnawialnych, możliwość odzysku materiałów po zakończeniu cyklu życia oraz realny czas użytkowania produktu [57].

Pomimo swojej przydatności w ocenie cyrkularności materiałowej produktu, metoda oparta na wskaźniku MCI wykazuje istotne ograniczenia wynikające z braku kompleksowości. Metoda traktuje produkt jako zbiór materiałowy pomijając szereg kluczowych aspektów technicznych i funkcjonalnych, m.in.: zakresu funkcjonalności produktu, konstrukcji, modułowości, naprawialności czy uciążliwości środowiskowej, które wydają się niezbędne do pełnej oceny cyrkularności produktu w ujęciu inżynierskim.

2.3.3. Wskaźnik CEI

Kolejnym wskaźnikiem opracowanym w celu ilościowej oceny tego, w jakim stopniu produkt odpowiada zasadom gospodarki o obiegu zamkniętym, jest wskaźnik ekonomiczny cyrkularności (CEI – *Circular Economy Index*). Wskaźnik ten, podobnie jak MCI, koncentruje się na analizie przepływu materiałów i mierzy stopień zamknięcia obiegu materiałowego w produkcji, uwzględniając zarówno:

- udział materiałów pochodzących z recyklingu wykorzystanych w procesie produkcji (*input*),
- potencjalną ilość materiałów możliwych do odzyskania po zakończeniu cyklu życia produktu (*output*).

Tym, co odróżnia CEI od podejścia prezentowanego przez MCI, jest uwzględnienie wartości rynkowej materiałów, a nie wyłącznie ich masy (zależność 2.3).

$$CEI = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.3)$$

gdzie:

V_{out} – wartość materiałów odzyskanych w procesie recyklingu (*output value*),

V_{in} – wartość materiałów zawartych w produktach, które trafiają do recyklingu (*input value*) [20].

Wskaźnik CEI uwzględnia to, że w procesie recyklingu część wartości ekonomicznej zawartej w produktach na końcu cyklu ich życia zostaje bezpowrotnie utracona. Wynikać to może przykładowo ze strat technologicznych, zanieczyszczeń czy niskiej jakości odzyskanych frakcji materiałów. Dlatego im większa wartość (w kategoriach ekonomicznych) zostanie efektywnie odzyskana i „sprzedana” z zyskiem, tym wyższy jest poziom efektywności cyrkularnej produktu. Takie podejście pozwala uwzględnić nie tylko aspekt środowiskowy, ale też ekonomiczną opłacalność realizacji strategii GOZ [20].

Jak podkreślają autorzy wskaźnika CEI, jest on wrażliwy na zmienne ceny surowców w czasie i to właśnie ten aspekt może utrudniać porównywanie wyników analiz wykorzystujących wskaźnik CEI [21]. Inną jego wadą jest to, że nie uwzględnia on zakresu funkcjonalności technicznej produktu oraz pomija aspekt trwałości produktu i jego uciążliwości środowiskowej. Nie ocenia także potencjału do wydłużenia cyklu życia przez naprawę, ponowne użycie czy regenerację. Można więc stwierdzić, że CEI nie odzwierciedla tych aspektów, które są istotne w ocenie cyrkularności obiektów technicznych.

2.3.4. Wskaźnik C-index

Twórcami wskaźnika określanego w literaturze jako C-index są Linder, Sarasini i van Loon [57]. Ich propozycja jest jednym z najbardziej złożonych wskaźników oceny cyrkularności produktu. Łączy w sobie trzy kluczowe aspekty gospodarki o obiegu zamkniętym: udział zasobów cyrkularnych, efektywność faktycznego użytkowania produktu oraz zdolność produktu do regeneracji lub zamknięcia pętli materiałowej (zależność 2.4).

$$C - index = \left(\frac{U_{circ}}{U_{circ} + U_{lin}} \right) \times \left(\frac{I}{I_{avg}} \right) \times R \quad (2.4)$$

gdzie:

U_{circ} – masa materiałów pochodzących z recyklingu, ponownego użycia, regeneracji lub źródeł odnawialnych) wykorzystanych w produkcji wyrobu,

U_{lin} – masa materiałów pierwotnych użytych do produkcji wyrobu,

I – rzeczywista intensywność użytkowania produktu,

I_{avg} – uśredniona intensywność użytkowania typowego produktu w danej kategorii,

R – współczynnik regeneracji (liczba od 0 do 1, która określa, na ile produkt da się przywrócić do obiegu po zakończeniu jego użytkowania) [57].

W oparciu o analizę zależności 2.4 można stwierdzić, że wskaźnik C-index stanowi narzędzie do wieloaspektowej oceny stopnia cyrkularności produktu. Pozwala oceniać zgodność produktu z zasadami GOZ pod kątem wykonania go z materiałów cyrkularnych, efektywności użytkowania i technicznego potencjału do ponownego wykorzystania (produktu lub jego elementów), naprawy lub recyklingu. Wykorzystywany może być przez inżynierów w ekoprojektowaniu, szczególnie w procesach podejmowania decyzji o wyborze rozwiązania konstrukcyjnego czy materiału.

C-index może też być narzędziem do poszukiwania optymalnych modeli biznesowych ze względu na efektywność użytkowania produktu. Modele, w których produkty wykorzystywane są przez wielu użytkowników intensywnie, są współdzielone oraz modele oparte na użytkowaniu zamiast posiadaniu osiągną wyższe wartości C-indexu niż w sytuacjach, kiedy produkty są nabywane indywidualnie i używane sporadycznie. Generalnie, C-index pozwala na ocenę zamknięcia pętli materiałowej niezależnie od wpływów środowiskowych wynikających z aspektów energetycznych [57].

Pomimo istotnych zalet wskaźnik C-index ma także ograniczenia. Jednym z kluczowych jest trudność w określeniu rzeczywistego czasu użytkowania produktu. Mierzenie rzeczywistej, jak i referencyjnej intensywności użytkowania produktu opiera się na danych, które w praktyce są często trudno dostępne, zwłaszcza dla produktów złożonych lub szybko rotujących. Oparcie wskaźnika na danych dotyczących intensywności użytkowania produktu wyłącznie w odniesieniu do produktów referencyjnych z tej samej grupy funkcjonalnej pozbawia wskaźnik uniwersalności i czyni go nieprzydatnym do porównań produktów z różnych kategorii lub o różnych funkcjach użytkowych.

Pewnym ograniczeniem wskaźnika C-index jest też skupienie wyłącznie na ilościowym aspekcie zamknięcia obiegu materiałów, bez odniesienia do ich rzeczywistej uciążliwości środowiskowej. Wskaźnik nie uwzględnia śladu węglowego, toksyczności ani energochłonności dla materiałów, które zostały ponownie użyte lub odzyskane w produkcji. W efekcie możliwa jest sytuacja, w której produkt wykonany z materiałów wtórnych, lecz trudnych do recyklingu, toksycznych lub energochłonnych, uzyska wysoką wartość C-indexu, mimo że jego wpływ środowiskowy będzie znacznie wyższy niż alternatywy o niższym poziomie formalnej cyrkularności. Wyniki uzyskane w oparciu o C-index w tym ujęciu mogą dawać obraz sprzeczny z celami zrównoważonego rozwoju lub mogą wymagać uzupełnienia innymi narzędziami, np. analizą cyklu życia (LCA).

Dyskusje może budzić również współczynnik R (regeneracji), który często opiera się na eksperckiej ocenie technicznej możliwości przywrócenia produktu do obiegu, bez uwzględnienia zakresu oraz charakteru procesu regeneracji (może ona mieć charakter jedynie prostej naprawy lub zaawansowanego *remanufacturingu*). Tymczasem to właśnie skala i złożoność regeneracji determinują rzeczywistą wartość użytkową i środowiskową tego procesu.

2.3.5. Certyfikacja C2C

Próbie opracowania metody oceny cyrkularności produktów podjął Cradle-to-Cradle Products Innovation Insititute. W wyniku jego prac powstały ramy certyfikacji C2C (*Cradle to Cradle Certified*), które pozwalają na ocenę i sprawdzenie, czy dany produkt wpisuje się w założenia koncepcji GOZ [53]. Zaproponowany sposób certyfikacji w przeciwieństwie do metody MFA nie skupia się wyłącznie na cyrkularności materiałowej, ale ocenia produkt z pięciu różnych perspektyw, weryfikując:

- czy materiały użyte w produkcji są bezpieczne dla ludzi i środowiska (*Material Health Requirements*),

- czy produkt wykazuje potencjał do ponownego użycia, recyklingu lub biodegradacji (*Product Circularity Requirements*),
- jaki jest wpływ cyklu życia produktu na emisje gazów cieplarnianych oraz stopień wykorzystania odnawialnej energii w produkcji (*Clean Air & Climate Protection Requirements*),
- czy produkt został wytworzony w sposób ograniczający zużycie wody, minimalizujący zanieczyszczenia oraz chroniący zasoby wodne i glebowe (*Water & Soil Stewardship Requirements*),
- czy produkt jest wytwarzany z poszanowaniem praw człowieka, uczciwych warunków pracy, zasad etyki produkcji oraz odpowiedzialności społecznej (*Social Fairness Requirements*).

W ramach każdej z wymienionych pięciu kategorii zadawane są konkretne pytania, na które odpowiada producent. W procesie oceny wymagane jest dostarczenie dokumentacji, takiej jak karty charakterystyki substancji (MSDS), raporty z audytów, schematy produktu (np. projekt demontażu), dane z zakładu produkcyjnego (zużycie wody, energii) oraz deklaracje dostawców. Ocena nie jest automatyczna, gdyż to eksperci analizują zebrane dane, zadają pytania uzupełniające i weryfikują zgodność z wymaganiami standardu. W ramach każdej z kategorii otrzymać można osobny wynik (*basic, bronze, silver, gold* lub *platinum*), a wynik końcowy oceny odpowiada najniższemu osiągniętemu poziomowi spośród pięciu ocenianych obszarów.

System Cradle to Cradle Certified® (*C2C Certified*) jest więc punktową oceną produktu w ramach każdej z 5 kategorii. Ma on charakter jakościowy i kwalifikacyjny, gdyż na drodze analizy weryfikowane jest spełnianie przez produkt szczegółowych progów i wymogów określonych dla każdej kategorii (np. minimalny udział materiałów wtórnych, zakres dokumentacji chemicznej, poziom emisji CO₂, itp.) [I.2].

Certyfikacja C2C znalazła zastosowanie w ponad 150 firmach z ponad 15 krajów. Certyfikację przeprowadzono dla ponad 8000 produktów z różnych kategorii, jak np. materiały budowlane, tekstylia, kosmetyki, produkty do pielęgnacji domu, papier, opakowania i polimery. Wśród firm, które wdrożyły certyfikację C2C, można wskazać m.in.:

- Shaw Industries – największy na świecie producent wykładzin dywanowych (ponad 85% produktów objął certyfikacją C2C),
- PUMA – firma produkująca obuwie, odzież i akcesoria sportowe (wprowadziła na rynek kompostowalne buty sportowe z certyfikatem C2C na poziomie Basic),
- Ecover – producent środków czystości (wdrożył certyfikację C2C w całym łańcuchu dostaw),
- Steelcase – producent mebli biurowych (znaczną część swojej oferty objął wymaganiami certyfikacji C2C) [I.6].

2.3.6. Metody kwestionariuszowe

Jednym ze znanych narzędzi mających charakter badania kwestionariuszowego jest arkusz cyrkularności produktu (PCDS – *Product Circularity Data Sheet*). Został on

opracowany w ramach inicjatywy Ministerstwa Gospodarki Luksemburga. Służy do zebrania i oceny danych dotyczących cyrkularności produktów i ma formę ankiety, w której na postawione pytania odpowiada się „tak”, „nie”, „nie dotyczy”. Informacje zbierane w PCDS są zorganizowane w logiczne sekcje, które dotyczą m.in. składu materiałowego, możliwości naprawy, projektowania do demontażu, wykorzystania materiałów z recyklingu oraz potencjału do ponownego użycia i recyklingu. PCDS nie mierzy cyrkularności produktu w formie ilościowej, ale zbiera informacje jakościowe na temat tego, czy produkt został zaprojektowany zgodnie z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Pozwala zatem dokonać jakościowej oceny cyrkularności produktu w oparciu o deklaracje techniczne [S.11]. Zebrane informacje mogą służyć do porównywania produktów, raportowania i oceny zgodności z regulacjami. PCDS może pełnić rolę organizacyjnego wzorca, pozwalającego na ustrukturyzowane gromadzenie danych jakościowych na temat cyrkularności produktów. Ze względu na zgodność z europejskimi normami (EN 45554, EN 45557) [N.6, N.7], może być zaadaptowany jako część przyszłego standardu cyfrowego paszportu produktu (DPP).

Drugim narzędziem o charakterze badania kwestionariuszowego jest formularz cyrkularności produktu (PCF – *Product Circularity Form*). Jest on określony w normie ISO 59040 [N.12] jako sformalizowany sposób oceny, który pozwala określić, w jakim stopniu produkt spełnia wymagania cyrkularności. Stanowi on narzędzie jakościowe, które obejmuje listę pytań, za pomocą których dokonuje się identyfikacji, w jakim stopniu dany produkt spełnia zasady GOZ. Główne obszary w formularzu PCF zgodnie z ISO 59040 dotyczą:

- składu materiałowego (czy i w jakim stopniu użyto materiałów z recyklingu oraz jaka jest czystość tych materiałów),
- możliwości demontażu (czy produkt został zaprojektowany tak, by dało się go łatwo rozłożyć na części),
- możliwości naprawy i ponownego użycia (czy istnieją instrukcje, części zamienne i zapewniony jest dostęp do serwisu),
- potencjału do recyklingu lub regeneracji (czy elementy można skutecznie przetwarzać po zakończeniu cyklu życia),
- informacji użytkowych i dokumentacji technicznej (czy wraz z produktem dostarczane są dane ułatwiające jego dalsze zagospodarowanie).

Ocena cyrkularności produktu opiera się na zastosowaniu kryteriów, które odzwierciedlają zasady GOZ. Kryteria te dotyczą m.in.: zawartości materiałów z recyklingu, możliwości ponownego użycia lub regeneracji, demontowalności, trwałości produktu, a także zgodności z wybranymi strategiami „R” (np. *reuse*, *repair*, *remanufacture*, *recycle*). Każdemu z wybranych kryteriów przypisuje się punktację (np. w skali 0–5 lub 0–1), a także wagę (w zależności od ich znaczenia dla konkretnego typu produktu lub branży). Po przeprowadzeniu punktowej oceny każdego z obszarów dokonuje się agregacji wyników, co pozwala uzyskać syntetyczny wskaźnik poziomu zgodności produktu z GOZ. Wynik ten może być prezentowany w postaci wartości liczbowej, poziomu kwalifikacyjnego (np. niski/średni/wysoki poziom cyrkularności) lub jako graficzna reprezentacja danych [N.12].

Cała procedura PCF zgodna z ISO 59040 ma na celu ocenę stopnia cyrkularności produktu już na etapie projektowania, ze szczególnym uwzględnieniem doboru materiałów, komponentów i cech konstrukcyjnych, które będą miały wpływ na dalsze strategie GOZ, takie jak ponowne użycie, demontaż, naprawa czy recykling. Pozwala ona również na identyfikację obszarów do poprawy i wsparcie podejmowania decyzji w zakresie projektowania, wytwarzania i strategii produktowych zgodnych z gospodarką o obiegu zamkniętym. PCF to narzędzie adresowane głównie dla projektantów, którym ma umożliwić:

- identyfikowanie elementów niespełniających założeń cyrkularności,
- dokonywanie porównywania alternatywnych rozwiązań konstrukcyjnych pod kątem ich wpływu na cykl życia produktu,
- podejmowanie lepszych decyzji projektowych z uwzględnieniem wymagań środowiskowych.

Metody kwestionariuszowe wykorzystywane są również jako sposób pomiaru wdrożenia zasad 10R, które zostały opisane w rozdziale 2.2 niniejszej rozprawy. Stanowią one jakościowy sposób przyporządkowania działań podejmowanych w cyklu życia produktu do określonych strategii GOZ i pozwalają ocenić zgodność działań z hierarchią cyrkularności oraz wskazują na ich znaczenie środowiskowe [78]. Narzędziami do pomiaru efektywności wdrożenia GOZ przez pryzmat zasad 10R są przykładowo:

- CEQI (*Circular Economy Quality Indicator*) – wskaźnik oceny wdrożenia strategii R w czterech wymiarach (technicznym, środowiskowym, ekonomicznym, społecznym) [78],
- ISO 59020 – weryfikacja spełnienia wymagań i wytycznych dla organizacji dotyczących pomiaru i oceny ich wydajności cyrkularnej w określonych systemach z uwzględnieniem strategii R [38],
- *Circularity Check, Circular Transition Indicators* – narzędzie online opracowane przez Berner Fachhochschule i KOF Swiss Economic Institute (ETH Zurich) służące do samooceny cyrkularności produktów oparte na strategiach 10R [I.4],
- systemy scoringowe – systemy, w których przyznawane są punkty za każdą realnie wdrożoną w produkcji strategię R z wagą zależną od pozycji w hierarchii (np. 1 pkt za każdą wdrożoną strategię R) [16].

Przyporządkowanie konkretnych praktyk organizacyjnych lub produktowych do odpowiednich strategii „R” umożliwia nie tylko ich ocenę jakościową, ale także tworzenie systemów oceny ilościowej – opartych na wskaźnikach i danych liczbowych.

W literaturze można znaleźć jeszcze inne przykłady integracji modelu strategii 10R z analizami wskaźnikowymi, które pozwalają mierzyć efektywność wdrażanie strategii GOZ oraz monitorować postępy transformacji cyrkularnej. Przyjmują one różne formy – od oceny udziału poszczególnych strategii w cyklu życia produktu, przez wskaźniki materiałowe i energetyczne, aż po złożone indeksy zrównoważenia.

2.3.7. Wskaźnik jakości gospodarki o obiegu zamkniętym

Duży wkład w rozwój wiedzy o monitorowaniu gospodarki o obiegu zamkniętym wniosła Kulczycka. W swoich publikacjach rozwinęła koncepcję mierzenia i oceny postępów transformacji w kierunku GOZ za pomocą wskaźników cyrkularności, uwzględniając zarówno różne poziomy analizy (makro-, mezo- i mikroekonomiczny), jak i zróżnicowane funkcje wskaźników (materiałowe, środowiskowe, ekonomiczne, społeczne oraz cyklu życia) [46]. Kulczycka nie ograniczyła się wyłącznie do oceny przepływów materiałowych jako wyznacznika poziomu cyrkularności produktu, organizacji, procesu czy systemu, jak ma to miejsce w przypadku wskaźników takich jak MCI czy CEI. Zaproponowała wielowymiarowe, zintegrowane podejście do pomiaru gospodarki o obiegu zamkniętym, które uwzględnia cztery uzupełniające się grupy kryteriów:

- techniczne – np. łatwość demontażu, modularność produktu, możliwość ponownego użycia lub regeneracji,
- środowiskowe – np. zużycie energii, emisje gazów cieplarnianych, wpływ na środowisko w cyklu życia produktu,
- ekonomiczne – np. udział przychodów generowanych z produktów cyrkularnych, efektywność kosztowa wdrożenia strategii GOZ,
- społeczne – np. tworzenie miejsc pracy w sektorach GOZ, działania edukacyjne i świadomość konsumencka [46].

Kulczycka podkreśla konieczność dostosowania zestawów wskaźników do specyfiki branży, produktu oraz celów organizacji, proponując również złożone narzędzia oceny, takie jak *Circular Economy Quality Indicator* (CEQI), który integruje aspekty jakościowe i ilościowe oceny cyrkularności [48]. Wskaźnik CEQI przypisuje oceny punktowe i wagi kryteriom, pozwala przeprowadzić zarówno analizę jakościową, jak i wyliczyć wartość liczbową, przydatną w procesach benchmarkingu [71]. Jego zastosowanie pozwala obliczyć złożony, liczbowy wskaźnik jakości wdrożenia GOZ dla analizowanego przypadku, którym potencjalnie może być system, proces, organizacja czy produkt [46].

Wskaźnik CEQI autorstwa Kulczyckiej ma wyraźnie szerszy, bardziej zintegrowany charakter niż typowe wskaźniki materiałowe (np. MCI, CEI). Dobrze sprawdza się przy kompleksowej ocenie systemów produkcyjnych i strategiach wdrażanych przez organizacje stosujące GOZ. Mimo swojego wielowymiarowego charakteru wskaźnik CEQI oznacza się pewnymi ograniczeniami. Niektóre ujęte w nim kryteria, takie jak ocena modularności czy świadomości konsumenckiej, są trudne do obiektywnego zmierzenia i wymagają eksperckiej interpretacji, co wpływa niekorzystnie na możliwości porównywania wyników między analizami. Dodatkowo, jego wdrożenie może być złożone, gdyż przypisywanie wag i ocen punktowych wymaga specjalistycznej wiedzy oraz czasu. Ponadto, w porównaniu do takich wskaźników jak MCI czy CEI, CEQI w mniejszym stopniu koncentruje się na ilościowym aspekcie oceny stopnia cyrkularności analizowanego obiektu (produktu, systemu, organizacji czy procesu), co ogranicza jego zdolność do precyzyjnego pomiaru.

2.3.8. Mierniki stosowane do oceny wdrażania GOZ

Analizy wskaźnikowe gospodarki o obiegu zamkniętym opierają się zazwyczaj na taksonomii wskaźników cyrkularności, które mogą być dowolnie kształtowane w zależności od specyfiki produktu, branży czy przedsiębiorstwa. Lista wskaźników proponowanych w literaturze nie stanowi katalogu zamkniętego. Można je jedynie kategoryzować ze względu na kryteria, do których się odnoszą. Z tej perspektywy zazwyczaj wyróżnia się grupy kryteriów środowiskowych, społecznych i ekonomicznych.

Jeden z bardziej popularnych zestawów mierników służących kompleksowej ocenie wdrażania strategii cyrkularnych na poziomie organizacyjnym zaproponował Zorpas [103]. Obejmuje on takie mierniki jak:

- % zredukowanych lub ponownie użytych odpadów w procesie,
- % materiału z recyklingu użytego w procesie produkcji,
- % energii z paliw kopalnych zastąpionej energią odnawialną,
- ilość wody poddanej recyklingowi,
- % redukcji zużycia wody pitnej,
- % zawartości ponownie użytych materiałów w produkcji,
- udział wartości naprawionych komponentów w produkcji,
- zmniejszenie emisji CO₂ przez ponowne użycie materiałów,
- % produktów poddanych drugiemu cyklowi życia (w skali roku),
- zwiększenie możliwości naprawy produktu przez użytkownika,
- średnia długość życia produktu lub materiału w stosunku do średniej branżowej,
- % ponownie użytej zawartości pochodzącej z odpadów,
- % rzeczywistego recyklingu odpadów,
- % recyrkulacji materiałów w biologicznym cyklu życia,
- średni % zużywanej energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych,
- % wody pobieranej ze źródeł cyrkularnych,
- % odprowadzanej wody zgodnie z zasadami cyrkularności,
- % recyklingu lub ponownego użycia wody na miejscu (np. w zakładzie produkcyjnym),
- udział przychodów z zasobów cyrkularnych (lub produktów cyrkularnych) w całkowitych przychodach.

Biorąc pod uwagę różnorodność mierników cyrkularności, obejmujących aspekty środowiskowe, surowcowe, energetyczne oraz organizacyjne, a także wynikającą z nich złożoność wskaźników cyrkularności, celowe staje się ich uporządkowanie w logiczne kategorie, wśród których Zorpas wyróżnia [103]:

- wskaźniki zasobów (określające stopień efektywności zarządzania materiałami i surowcami),
- wskaźniki emisji i energii (określające stopień redukcji emisji i zużycia energii),
- wskaźniki efektywności GOZ (określające stopień wdrażania strategii GOZ w przedsiębiorstwach).

Przedstawione w niniejszym rozdziale metody i propozycje wskaźników oraz próby ich kategoryzacji mogą być stosowane w monitorowaniu i ocenie postępów transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Jak wynika z dokonanego przeglądu, mają one jednak w większości wycinkowy charakter. W konsekwencji tego powinny być każdorazowo dostosowywane do specyfiki analizowanego obiektu oraz do poziomu analizy (makro, mezo, mikro), szczególnie przy analizach sektorów gospodarki.

Choć katalog wskaźników pozostaje otwarty, a ich dobór powinien cechować się pewną elastycznością, dążenie do ich standaryzacji (jak spróbowano to uczynić w normach ISO 59020) jest w pełni pożądane, gdyż powinno ono sprzyjać coraz skuteczniejszemu zarządzaniu transformacją w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym, m.in. przez wzrost możliwości porównywania wyników różnych analiz.

2.4. Przykłady wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym

2.4.1. Przemysł opakowaniowy

W ramach przeglądu literatury zaprezentowanego w rozdziałach 2.1-2.3 niniejszej rozprawy zawarto szereg informacji o praktycznych zastosowaniach koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Jak kilkakrotnie wspomniano, odnosiły się one nie tylko do wąsko rozumianego działania pojedynczych zakładów przemysłowych, ale też do analizy całych sektorów gospodarki lub działalności na określonym obszarze geograficznym. W związku z szerokim zakresem potencjalnych zastosowań GOZ postanowiono ograniczyć przegląd przykładów wdrażania tej koncepcji do wybranych obszarów działalności przemysłowej człowieka.

Z największym rozpowszechnieniem wdrażania założeń koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym mamy do czynienia w branży opakowaniowej. W odniesieniu do tej branży szerokie zastosowanie mają zasady 3R (*Reduce – Reuse – Recycle*), a jednym z powszechnie znanych przykładów ich wdrażania jest coraz szersze stosowanie opakowań wielokrotnego użytku. Innym istotnym kierunkiem wdrażania koncepcji GOZ w branży opakowaniowej jest stosowanie ekologicznych, biodegradowalnych opakowań nadających się do recyklingu [99]. Takie podejście pozwala nie tylko zmniejszyć ilość odpadów, lecz również ograniczyć wpływ całego cyklu życia produktu na środowisko [104].

Kolejnym przykładem wdrażania GOZ mogą być systemy kaucyjne. Ich mechanizm polega na pobieraniu kaucji przy zakupie określonych produktów i jej zwrocie w momencie oddania opakowania do punktu sprzedaży lub punktu zbiórki opakowań. System ten uznawany jest za jedno z najbardziej efektywnych narzędzi wspierających obieg zamknięty w gospodarce opakowaniami. Poza opakowaniami szklanymi od niedawna jest on rozszerzany o możliwość zwrotu opakowań jednorazowych wykonanych z tworzyw sztucznych czy metalu [64].

Do realizacji procesu przepływu opakowań z powrotem od klienta do producenta w celu ich ponownego użycia, recyklingu lub właściwego usunięcia konieczne jest zapewnienie sprawnej tzw. logistyki zwrotnej. Efektywne zarządzanie logistyką zwrotną

przyczynia się do zwiększenia efektywności systemów kaucyjnych i redukcji odpadów opakowaniowych [80].

Wojciechowska i Wyszumirska [101] przedstawiają kilka przykładów efektywnego wdrożenia koncepcji GOZ do branży opakowaniowej. Wskazują one m.in. na:

- Loop – platformę dystrybucji produktów w opakowaniach zwrotnych, rozwijaną przez firmę TerraCycle; platforma umożliwia zakup produktów znanych marek (m.in. Nestlé, Unilever, Coca-Cola) w trwałych opakowaniach wielokrotnego użytku; po zużyciu opakowania są odbierane od klienta, czyszczone, ponownie napełniane i trafiają do kolejnych użytkowników; celem Loop jest całkowita eliminacja jednorazowych opakowań i maksymalne wykorzystanie istniejących zasobów,
- Algramō (Chile) – firmę oferującą mobilne stacje napełniania, w których klienci mogą uzupełniać własne pojemniki detergentami i środkami czystości; system wykorzystuje aplikację mobilną i technologię RFID, co umożliwia precyzyjne naliczanie zużycia i kontrolę napełniania; model „pay-per-use” pozwala klientom płacić tylko za produkt, bez kosztu opakowania,
- DOT. – sieć polskich drogerii zero waste, które oferowały sprzedaż kosmetyków i środków czystości na wagę lub do własnego opakowania; klienci przynosili własne pojemniki i samodzielnie je napełniali; proponowane rozwiązanie wspierało eliminację opakowań jednorazowych i promowało odpowiedzialne wzorce konsumpcji.

Przykładów innych działań podejmowanych przez przedsiębiorstwa w celu zapewnienia wysokiej cyrkularności opakowań w skali świata jest wiele. Kategoryzując je przez pryzmat strategii „R” można wymienić m.in. [69]:

- eliminację opakowań jako zbędnego elementu produktu (strategii *Refuse*),
- ograniczenie liczby opakowań w obiegu (strategia *Reduce*),
- weryfikowanie funkcji opakowania i maksymalizowanie jego użyteczności (strategia *Rethink*),
- projektowanie opakowań z myślą o recyklingu (strategia *Recycle*) [S.4].

2.4.2. Przemysł motoryzacyjny

Wiele przykładów zastosowania koncepcji GOZ lub jej elementów można znaleźć w przemyśle motoryzacyjnym. Zintegrowane podejście do stosowania GOZ w przypadku tej branży obejmuje projektowanie produktów z myślą o demontażu i recyklingu, zapewnienie możliwości ponownego wykorzystania części, stosowanie materiałów łatwych do odzysku oraz rozwój logistyki zwrotnej [63]. Szczególny nacisk kładzie się też na minimalizację odpadów oraz zamykanie obiegów materiałowych – zwłaszcza metali i elementów baterii.

W literaturze naukowej dotyczącej problematyki GOZ w branży motoryzacyjnej podkreśla się znaczenie procesów remanufacturingu i refurbishingu jako procesów odnowy używanych części (np. silników, alternatorów czy baterii), co ma służyć wydłużeniu cyklu życia komponentów pojazdów [81]. Istotne miejsce we wdrażaniu koncepcji GOZ w branży motoryzacyjnej stanowi także praktyczne stosowanie

projektowania dla demontażu (DfD) jako elementu koncepcji *Design for X* [22]. Coraz częściej w odniesieniu do elementów pojazdów stosuje się paszporty materiałowe, co ma ukierunkować działania związane z rozbiórką i sortowaniem komponentów. Z nimi związana jest konieczność organizacji efektywnej logistyki zwrotnej, która zapewnia sprawny przepływ wycofanych z użytku pojazdów, części i baterii do zakładów demontażu, recyklingu lub regeneracji [58].

Ze względu na ogromne ilości metali (np. stali, aluminium, miedzi), tworzyw sztucznych i rzadkich pierwiastków (zwłaszcza w pojazdach elektrycznych), jakie zużywa przemysł motoryzacyjny, w badaniach wskazuje się też na potrzebę zwiększenia udziału surowców wtórnych, szczególnie w produkcji aluminium, stali i tworzyw sztucznych [32, 62]. To również jest działanie zgodne z założeniami koncepcji GOZ.

Innym przejawem przeobrażania się branży motoryzacyjnej w kierunku zgodnym z GOZ jest zmiana promowanych modeli biznesowych. W literaturze często pojawia się koncepcja odejścia od modelu „sprzedaj i zapomnij” na rzecz modeli serwisowych (np. „*car-as-a-service*”, leasing części, subskrypcje mobilności), co wiąże się z nowym podejściem do własności i użytkowania produktów, promując większą odpowiedzialność producenta za cały cykl życia [24].

Istnieją podmioty branży motoryzacyjnej, które podejmują działania określone wprost, jako wpisujące się w GOZ. Przykładem może tu być koncern BMW, które wdraża strategię *Design for Circularity*, dążąc do zwiększenia udziału materiałów wtórnych w produkcji pojazdów oraz ułatwienia ich recyklingu po zakończeniu eksploatacji. BMW wdraża cztery kluczowe zasady cyrkularności już na etapie projektowania:

- preferowanie materiałów łatwych do odzysku i recyklingu, takich jak aluminium i stal z recyklingu,
- projektowanie pojazdów z mniejszą liczbą części, co ułatwia demontaż i recykling,
- stosowanie metod montażu umożliwiających łatwe rozłączenie elementów (np. łączenie używając śrub i zatrzasków zamiast trwałych połączeń klejonych),
- eliminowanie lub ułatwienie usuwania substancji utrudniających recykling.

BMW prowadzi Centrum Recyklingu i Demontażu (RDC) w Monachium, w którym rozwija procesy umożliwiające efektywny recykling pojazdów, w tym opracowuje i wdraża innowacyjne metody demontażu i recyklingu komponentów. Jedną z nowszych koncepcji produktowych koncernu to „*i Vision Circular*” – w pełni elektryczny, wykonany w 100% z materiałów wtórnych samochód, zaprojektowany zgodnie z zasadami *Rethink, Reduce, Reuse, Recycle* [I.8].

Innym przykładem wdrażania koncepcji GOZ w branży motoryzacyjnej jest fabryka Renault w pobliżu miasta Flins. Została ona nazwana „*Re-Factory*” i stanowi centrum gospodarki o obiegu zamkniętym. Zakład ten realizuje takie działania jak m.in.:

- *Retrofit* – modernizacja i przystosowywanie starszych pojazdów do nowych standardów, w tym konwersja na napęd elektryczny,
- *Reenergy* – rozwój rozwiązań związanych z produkcją, magazynowaniem i zarządzaniem zieloną energią,
- *Recycle* – recykling materiałów i komponentów z pojazdów wycofanych z eksploatacji [I.11].

2.4.3. Przemysł budowlany

W branży budowlanej istnieje wiele przykładów zastosowań koncepcji GOZ. Większość z nich koncentruje się na minimalizacji ilości generowanych odpadów i ponownym wykorzystaniu materiałów. Przykładami tego są m.in.: używanie materiałów z odzysku (np. gruzu betonowego, drewna z rozbiórek, przetopionej stali), wdrażanie alternatywnych materiałów, jak np. konopi, słomy, cegieł z odpadów przemysłowych [64]. Zdecydowanie rzadziej spotyka się przykłady projektowania budynków z myślą o ich przyszłym łatwym demontażu i recyklingu. Efektem stosowania takiego podejścia jest przykładowo modularność budynków, która umożliwia ponowne wykorzystywanie komponentów budowlanych i również znacząco ogranicza ilość odpadów [68].

Wdrażanie GOZ w branży budowlanej czasami wspierane jest przez wykorzystywanie metody LCA (*Life Cycle Assessment*) jako narzędzia umożliwiającego ocenę wpływu środowiskowego budynków na każdym etapie ich cyklu życia – od produkcji materiałów po rozbiórkę [13]. Wśród narzędzi mogących wspierać cyrkularne budownictwo jest też BIM (*Building Information Modeling*). Służy on do integracji danych projektowych, materiałowych i operacyjnych, co ułatwia planowanie demontażu i odzysku materiałów zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym [5].

Jednym z kluczowych kierunków wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze budowlanym jest *Urban Mining*. Polega on na systematycznym odzyskiwaniu materiałów i surowców z istniejącej infrastruktury – głównie z budynków przeznaczonych do rozbiórki, wycofanych z eksploatacji instalacji oraz elementów konstrukcyjnych. Głównym założeniem *Urban Mining* jest traktowanie miasta jako „magazynu surowców wtórnych”, co pozwala ograniczyć eksploatację zasobów naturalnych i zmniejszyć ślad środowiskowy nowo budowanych obiektów. W praktyce *Urban Mining* obejmuje m.in. demontaż budynków w sposób umożliwiający ponowne wykorzystanie cegieł, stali, drewna, armatury czy okien, a także odzyskiwanie materiałów do recyklingu, takich jak beton, szkło czy metale kolorowe. Proces ten jest często wspierany przez cyfrowe narzędzia, takie jak paszporty materiałowe, które dokumentują pochodzenie, stan i lokalizację komponentów budowlanych – ułatwiając ich lokalizację a tym samym pośrednio ponowne użycie. *Urban Mining* pomaga osiągać cele zakładane przez GOZ m.in. dzięki temu, że:

- wydłuża cykl życia materiałów, zmniejszając ilość odpadów budowlanych,
- redukuje emisje CO₂ związane z produkcją pierwotną materiałów budowlanych,
- zwiększa lokalną samowystarczalność materiałową miast i regionów,
- wspiera nowe modele biznesowe w logistyce i przemyśle rozbiórkowym.

Jednym z przykładów zastosowania koncepcji *Urban Mining* jest projekt Warner Homes w Peorii (USA), gdzie budynki mieszkalne przeznaczone do rozbiórki zostały zdemontowane w sposób umożliwiający odzysk drewna konstrukcyjnego, cegieł i podłóg drewnianych. Materiały te zostały ponownie wykorzystane przez lokalny urząd ds. mieszkaniowych, co pozwoliło na zmniejszenie zapotrzebowania na nowe zasoby w kolejnych inwestycjach społecznych [33]. Podobnie, w projekcie *Fort Ord Pilot Deconstruction* w Kalifornii, z kompleksu dawnych obiektów wojskowych odzyskano drewno, dachówki i płyty drewnopochodne. Szczególnie istotne było wdrożenie systemu

jakościowej oceny materiałów i ich klasyfikacji do ponownego użycia – zgodnie z zasadami GOZ dotyczącymi bezpiecznego obiegu materiałów [33].

Przykładem *Urban Mining* w Europie jest *Circl Pavilion* w Amsterdamie. Jest to cyrkularny budynek zaprojektowany w 100% z myślą o demontażu i recyklingu. Do jego budowy wykorzystano m.in. okna i schody pochodzące z rozebranych biurowców oraz innowacyjne materiały izolacyjne z recyklingu tekstyliów. *Circl Pavilion* pokazuje, że koncepcję urban mining można wdrażać już na etapie projektowania budynku, wpisując GOZ w „DNA” inwestycji [3]. Innym europejskim przykładem jest zaawansowany UMAR Pavilion w Dübendorfie (Szwajcaria), gdzie w ramach kampusu badawczego NEST powstał budynek demonstracyjny oparty wyłącznie na materiałach wtórnych. Zastosowano tu komponenty o pełnej identyfikowalności dzięki cyfrowym paszportom materiałowym, co stanowi wzorcową implementację zasady śledzenia zasobów w GOZ [3].

2.4.4. Przemysł elektroniczny

Podobnie, jak w przemyśle motoryzacyjnym tak i w przemyśle elektronicznym, wdrażanie idei gospodarki o obiegu zamkniętym w ostatnich latach zyskuje na popularności. W obu przypadkach sposób podejścia do stosowania tej koncepcji jest ukierunkowany w podobny sposób. Oczekiwana transformacja dotyczy już etapu projektowania i zakłada przede wszystkim stosowanie wybranych zasad projektowania z uwzględnieniem perspektywy:

- możliwości ponownego użycia (*Design for Re-Use*),
- łatwości naprawy (*Design for Repair*),
- łatwości demontażu (*Design for Disassembly*),
- zdolności co recyklingu (*Design for Recycling*) [76].

Efektami stosowania wymienionych zasad koncepcji *Design for X* w branży elektronicznej są m.in.:

- tworzenie produktów i komponentów tak, aby po zakończeniu ich pierwotnej eksploatacji mogły zostać ponownie użyte do realizacji tej samej lub zmodyfikowanej funkcji, bez konieczności znaczącego przetwarzania (dotyczy to m.in. obudów, modułów pamięci, akcesoriów) [44],
- zapewnienie użytkownikowi i serwisom łatwego dostępu do komponentów i instrukcji serwisowania (zaleca się m.in. stosowanie modułowych konstrukcji, śrub zamiast klejów, dostępnych i zunifikowanych części zamiennych) [14, 35],
- zapewnienie możliwości szybkiego i łatwego demontażu sprzyjającego efektywnemu odzyskowi komponentów i surowców w procesach recyklingu lub remanufacturingu (chodzi tu np. o eliminację konieczności używania skomplikowanych narzędzi i niszczenia połączeń) [94],
- dobór materiałów jednorodnych, łatwych do separacji, niełączonych chemicznie (m.in. wielowarstwowe plastiki), a także oznaczonych zgodnie z systemami klasyfikacji materiałowej [94].

Firmy branży elektronicznej podejmują również nietypowe inicjatywy ukierunkowane na realizację koncepcji GOZ. Dobrym tego przykładem są rezultaty inicjatywy naukowej firmy Apple, która zaprojektowała i wdrożyła do stosowania robot recyklingowy nazwany Daisy. Służy on do demontażu iPhone'ów w celu odzyskania cennych materiałów, takich jak metale ziem rzadkich, kobalt czy aluminium. Daisy może zdemontować do 200 urządzeń na godzinę, co znacząco zwiększa efektywność procesu recyklingu. Technologia ta pozwala na odzysk surowców z dziewięciu różnych modeli iPhone'ów i przyczynia się do zmniejszenia ilości odpadów elektronicznych, promując koncepcję zamkniętego obiegu materiałów [53]. Ponadto firma Apple intensywnie pracuje nad zwiększeniem udziału materiałów pochodzących z recyklingu w swoich produktach. Firma wykorzystuje m.in. 100% recyklingowanego aluminium w obudowach MacBooków oraz 100% recyklingowanej cyny w lutowaniu płyt głównych. Ponadto, Apple stosuje recyklingowany kobalt w bateriach oraz recyklingowane metale ziem rzadkich w komponentach swoich urządzeń. Działania te są częścią strategii firmy mającej na celu osiągnięcie neutralności w zakresie śladu węglowego do 2030 roku [I.7].

Innym pozytywnym przykładem myślenia w kategorii koncepcji GOZ jest holenderska firma Fairphone, która produkuje smartfony zaprojektowane z myślą o łatwej naprawie i długowieczności. Opracowała ona „etyczny” smartfon charakteryzujący się modułową konstrukcją, która umożliwia użytkownikom samodzielną wymianę kluczowych komponentów, takich jak bateria, ekran czy aparat fotograficzny. Dodatkowo, firma stosuje materiały pochodzące z recyklingu oraz surowce pozyskiwane w sposób etyczny, co w powszechnej opinii czyni ich produkty bardziej zrównoważonymi [75].

Wdrażanie koncepcji GOZ do działalności przedsiębiorstw branży elektronicznej jest stymulowane na wiele różnych sposobów. Na rynku europejskim znacząca jest rola uregulowań w zakresie Rozszerzonej Odpowiedzialności Producenta za wyrób, a szczególnie w zakresie zarządzania zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym (WEEE). Liderem na tym polu są Niemcy, które wdrożyły skuteczny system zbiórki i przetwarzania elektroodpadów, oparty na ustawie ElektroG [N.2] wdrażającej dyrektywę UE 2012/19/EU. Zaangażowali oni do niego producentów, dystrybutorów, władze lokalne i organizacje pozarządowe. Efektywność systemu zbudowanego w Niemczech znacznie przekracza wymagania unijne, przy czym system ten jest uznawany za dobry przykład skutecznej współpracy wszystkich uczestników rynku [51].

2.4.5. Przemysł tekstylny i odzieżowy

Kolejnym przykładem wdrażania do praktyki funkcjonowania firm założeń koncepcji GOZ jest branża tekstylna i odzieżowa. W ostatnich latach coraz więcej mówi się o konieczności transformacji cyklu życia produktów odzieżowych ze względu na znaczący poziom generowanych niekorzystnych oddziaływań środowiskowych. W związku z tym pojawiają się producenci odzieży, którzy w swoich działaniach uwzględniają takie postulaty, jak:

- stosowanie założeń projektowania zrównoważonego (ukierunkowuje ono procesy projektowania na zwiększenie trwałości, możliwość naprawy i recyklingu tekstyliów),
- używanie materiałów pochodzących z recyklingu oraz surowców odnawialnych o niższym śladzie środowiskowym,
- wdrażanie modeli biznesowych opartych na zapewnieniu możliwości ponownego użycia (promowanie wypożyczalni, sprzedaży ubrań używanych, upcyklingu i regeneracji odzieży),
- organizowanie systemu zbiorów i recyklingu tekstyliów (rozwijane jest to zarówno przez duże marki, jak i przez niezależnych producentów i pośredników handlowych),
- edukowanie konsumentów i zapewnienie transparentności łańcucha dostaw (m.in. paszporty produktów i certyfikaty zrównoważonego pochodzenia) [25].

Jednym z najbardziej znanych przykładów wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w branży tekstylnej jest działalność firmy H&M, która realizuje globalny program zbiórki zużytej odzieży dostępny we wszystkich sklepach stacjonarnych. Inicjatywa ta umożliwia konsumentom oddawanie niepotrzebnych tekstyliów, które są następnie poddawane sortowaniu oraz kierowane do ponownego użycia, recyklingu lub innych form odzysku materiałowego [S.2]. Równolegle, H&M pracuje (wspólnie z instytutem badawczym HKRITA – Hong Kong Research Institute of Textiles and Apparel) nad opracowaniem technologii umożliwiającej przemysłowy recykling tkanin mieszanych, a w szczególności polibawełny. Technologia ta wykorzystuje proces hydrotermalny do separacji włókien bez konieczności stosowania chemikaliów niebezpiecznych dla środowiska. Strategię zrównoważonego rozwoju marki H&M wyraża również przez rozwój linii produktów *Conscious Collection*, które oparte są na surowcach pochodzących z odzysku [S.2].

Innym przykładem skutecznego wdrażania modeli GOZ w branży odzieżowej jest szwedzka marka Nudie Jeans. Oferuje ona bezpłatne usługi naprawy swoich produktów oraz prowadzi sprzedaż odzieży używanej w ramach własnych kanałów dystrybucyjnych. Jej strategia opiera się na promowaniu ponownego używania (*Reuse*), wydłużaniu cyklu życia produktów oraz przejrzystości łańcucha dostaw, co czyni firmę jednym z liderów transformacji cyrkularnej w sektorze denimu [23].

Jeszcze inne przedsiębiorstwo pochodzące ze Szwecji (Renewcell) opracowało i wdrożyło technologię Circulose®, która umożliwia recykling tekstyliów celulozowych do postaci masy włóknistej mogącej być ponownie wykorzystaną w produkcji przędzy i tkanin. Dzięki temu firma informuje, że ogranicza zapotrzebowanie na surowce pierwotne oraz umożliwia zamknięcie obiegu materiałowego w skali przemysłowej [25].

Z perspektywy wdrażania koncepcji GOZ w branży tekstylnej istotna jest rola cyfrowych paszportów produktów. Są one wykorzystywane m.in. do umożliwienia śledzenia cyklu życia produktu i promowania jego cyrkularności. Koreponduje to z wprowadzanymi do branży regulacjami UE i wytycznymi co do zapewnienia transparentności łańcucha dostaw. Rozwiązania służące do podobnych celów zaproponowała amerykańska firma EON opracowując protokół CircularID™. Jest to

system, który umożliwia nadawanie każdemu produktowi tekstylnemu unikalnego identyfikatora cyfrowego, zawierającego informacje dotyczące m.in. składu materiałowego, śladu węglowego, lokalizacji produkcji oraz statusu cyrkularności (np. regenerowany, recyklingowany). Z rozwiązania korzystają takie marki jak H&M, Zalando, PVH czy Net-a-Porter. Dzięki integracji z chmurą danych, identyfikatory te ułatwiają zarządzanie cyklem życia produktów oraz zwiększają transparentność wobec konsumentów i podmiotów zajmujących się recyklingiem [I.9].

Podobnym sposobem znakowania jest rozwiązanie proponowane przez niemiecką platformę Circular.Fashion, która wdrożyła technologię Circularity.M®. Jest to system naszywanych identyfikatorów cyfrowych stosowanych m.in. przez marki Armedangels, LANIUS i Brava Fabrics. Są to „paszporty”, które umożliwiają precyzyjną identyfikację składników produktu i warunków jego przetworzenia oraz wskazują na możliwości recyklingu i ponownego użycia. Ułatwiają one również klasyfikację i sortowanie tekstyliów, co ma istotne znaczenie dla rozwoju zamkniętych łańcuchów wartości w modzie [I.3].

Działania podjęte przez wymienione firmy wpisują się w inicjatywę Komisji Europejskiej dotyczącą wdrożenia obowiązkowych cyfrowych paszportów produktów dla sektora tekstylnego od 2026 roku. Zgodnie z propozycją rozporządzenia *Ecodesign for Sustainable Products Regulation* i strategią *EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles*, każdy produkt z kategorii „tekstylia” wprowadzany na rynek UE będzie musiał posiadać cyfrowy profil zawierający informacje o składzie, trwałości, możliwości naprawy, demontażu i recyklingu [S.5]. Celem tego działania jest poprawa przejrzystości łańcuchów dostaw, wspieranie decyzji konsumenckich oraz wzmocnienie odpowiedzialności producentów w całym cyklu życia produktu. Inicjatywa ta stanowi istotny krok w kierunku standaryzacji i pełnego wdrożenia zasad GOZ w europejskim przemyśle odzieżowym [S.5].

2.4.6. Przemysł jachtowy

Z perspektywy wdrażania koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym przemysł jachtowy można zaliczyć do kategorii najmniej odpowiadających założeniom GOZ obszarów transportu. Wnioski takie wynikają nie tylko z braku doniesień literaturowych wskazujących na systemowe wdrażanie GOZ, ale też z publikacji wskazujących na bariery, na jakie napotkałyby podmioty dążące do podniesienia poziomu cyrkularyzacji jachtów. We wspomnianych publikacjach za kluczowe bariery uznaje się złożoność techniczną jednostek pływających oraz materiały, z których w większości przypadków wykonane są ich kadłuby. Większość kadłubów małych i średnich jednostek pływających budowana jest (podobnie jak np. łopaty turbin wiatrowych) z laminatów (GFRP, CFRP), które zapewniają znakomite właściwości mechaniczne – wysoką wytrzymałość na rozciąganie, odporność na korozję, dość niską masę i dużą swobodę projektowania formy [19]. To właśnie dzięki nim możliwe jest projektowanie lekkich, smukłych i jednocześnie wytrzymałych kadłubów, które zrewolucjonizowały żeglarstwo rekreacyjne i sportowe w drugiej połowie XX wieku.

Wspomniane kompozyty są trudne w obróbce mechanicznej i w praktyce nie są poddawane recyklingowi. Są one materiałami złożonymi, łączącymi dwie (lub więcej) fazy o różnych właściwościach: osnowę (zwykle żywicę polimerową) oraz zbrojenie (np. włókna szklane, węglowe, aramidowe). Taka struktura zapewnia korzystne właściwości mechaniczne, ale jednocześnie uniemożliwia łatwe rozdzielanie komponentów. Dostępne obecnie technologie recyklingu kompozytów, jak np. piroliza, spalanie w piecach cementowych czy rozdrabnianie mechaniczne, są zbyt kosztowne, albo prowadzą do utraty właściwości materiałów, która uniemożliwia ich ponowne wykorzystanie na tym samym poziomie technologicznym (tzw. *downcycling*). Przykładowo mechaniczne mielenie kadłuba z GFRP pozwala uzyskać wypełniacz do niskiej jakości betonu, ale nie prowadzi do odzysku wartościowych włókien czy żywicy. Z kolei piroliza umożliwia oddzielenie włókien od żywicy, lecz wymaga wysokich temperatur, jest energochłonna i generuje emisje toksycznych substancji. Odzyskane włókna często tracą na wytrzymałości, co ogranicza możliwości ich ponownego zastosowania.

W realiach funkcjonowania przemysłu jachtowego do niedawna nie istniało pojęcie odpowiedzialności za los jednostek po zakończeniu ich eksploatacji. Fakt, że przeciętny jacht ma żywotność rzędu 30–40 lat, a fala produkcji laminatowych jednostek rozpoczęła się w latach 70-tych XX wieku, ma ścisły związek z gwałtownym wzrostem liczby porzucanych wraków. Problem ten narasta, gdyż czas eksploatacji jachtów produkowanych w technologii laminatowej (mimo jego przedłużania dzięki realizowanym naprawom) dopiero od niedawna zaczął się kończyć. Koszt legalnej utylizacji takiego jachtu – często wynoszący kilka tysięcy euro – spoczywa w całości na ostatnim właścicielu jednostki, czyli osobie fizycznej lub podmiocie, który posiada jacht w momencie zakończenia jego eksploatacji.

To właśnie wysokie koszty legalnego demontażu są powodem nielegalnego porzucania jachtów na plażach, w marinach, na mieliznach lub celowego ich zatapiania. Czasami przez duże podmioty wykupywane są całe wyspy lub izolowane tereny przybrzeżne po to, aby przeznaczać je na dzikie wysypiska wraków. Brak nadzoru, trudność w identyfikacji właścicieli oraz niska egzekucyjność prawa powodują, że zjawisko to przybiera na sile. Takie wraki pozostawione bez zabezpieczenia trwale zanieczyszczają środowisko, uwalniając toksyczne substancje: biocydy z farb przeciwporostowych, resztki paliwa, olejów, tworzyw sztucznych i metali ciężkich. Istotnym problemem w kontekście zagospodarowania wycofanych z eksploatacji jednostek pływających jest też proceder sprzedaży jednostek do podmiotów pływających pod tzw. „tanimi banderami”, np. zarejestrowanymi w państwach o słabych regulacjach środowiskowych i niskiej kontroli. W takim modelu stary jacht, który w kraju producenta – zgodnie z obowiązującym prawem – powinien zostać zutylizowany w sposób bezpieczny i zgodny z zasadami ochrony środowiska, trafia do nowego właściciela za granicą, gdzie obowiązki te nie mają zastosowania lub są ignorowane. Takie transakcje pozwalają formalnie pozbyć się odpowiedzialności i są formą „eksportu problemu” do krajów o niższych standardach środowiskowych [4, 79].

Konsekwencje opisanych wyżej działań są poważne i wielowymiarowe. Należą do nich m.in.:

- trwałe skażenie ekosystemów przybrzeżnych i morskich związkami toksycznych substancji,
- zagrożenie dla bezpieczeństwa żeglugi (np. ze strony zatopionych wraków),
- szpecenie krajobrazu i pogorszenie warunków życia lokalnych społeczności,
- utrata potencjalnych surowców, które – przy zastosowaniu odpowiednich technologii – mogłyby być odzyskane [91].

Świadomy środowiskowo właściciel jachtu, którego okres eksploatacji dobiega końca również napotyka szereg problemów. Nie posiadając odpowiedniej wiedzy technicznej czy środków finansowych, zostaje pozostawiony sam sobie z odpowiedzialnością za wysoce problematyczny technicznie odpad. Przyczyną jego problemu jest bowiem brak zorganizowanego systemu zwrotu, rozbiórki i odzysku zużytych kompozytowych jednostek pływających (szczególnie jachtów rekreacyjnych) [70].

Należy jednak podkreślić, że problem braku systemowych rozwiązań w zakresie demontażu, utylizacji i recyklingu jachtów nie dotyczy tylko jednostkowych decyzji właścicieli jachtów. Obecnie cała branża funkcjonuje w oderwaniu od zasad gospodarki o obiegu zamkniętym, co prowadzi do wskazanych wcześniej, negatywnych zjawisk środowiskowych i społecznych [30].

Opisany stan rzeczy unaocznia, że branża jachtowa stoi przed poważnym kryzysem odpowiedzialności środowiskowej i potrzebuje pilnego, systemowego podejścia do wdrożenia działań ukierunkowanych na wdrażanie GOZ w produkcji jachtów. Pewną pomocą w tym zakresie byłoby opracowanie narzędzia do oceny cyrkularności jachtu jako obiektu technicznego, w formie metody, której stosowanie byłoby wsparciem w procesach podejmowania decyzji na różnych etapach cyklu życia, a szczególnie podczas:

- projektowania nowych jednostek (z uwzględnieniem m.in. aspektów ich przyszłego demontażu, możliwości odzysku materiałów, modularności i zamienności komponentów),
- planowania produkcji (przez wybór bardziej zrównoważonych materiałów, np. łatwiejszych w recyklingu niż kompozyty),
- eksploatacji istniejących jednostek (przy wyborze kierunków działań dotyczących modernizacji, naprawy, ponownego użycia i wydłużania cyklu życia),
- zarządzania końcem życia (przez ocenę wpływu środowiskowego różnych opcji postępowania z wycofywaną jednostką).

Opracowanie takiej metody wpłynęłoby na:

- ograniczenie negatywnych konsekwencji środowiskowych na etapie końca cyklu życia jachtu,
- umożliwienie tworzenia „paszportów cyrkularności” jednostek, a tym samym ułatwienie rejestrowania ich stanu, transferu, remontów i sposobu zagospodarowania (elementów lub całego jachtu) po eksploatacji,
- poprawienie przejrzystości obrotu jachtami i ich częściami,
- kształtowanie podstaw przyszłych regulacji i zachęt (np. obniżek podatkowych za jachty o wysokim wskaźniku cyrkularności).

Tego typu narzędzie, bazujące na mierzalnych kryteriach i dostosowane do specyfiki branży jachtowej, w dłuższej perspektywie czasowej powinno stać się fundamentem transformacji sektora w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym, przeciwdziałając obecnym nielegalnym i nieetycznym praktykom związanym z zagospodarowywaniem zużytych jachtów.

Powyższy przegląd literatury przedstawia ogólny charakter opisu zagadnień związanych z GOZ oraz niedostatek wytycznych dotyczących sposobów wdrażania tej koncepcji, szczególnie w odniesieniu do działalności przemysłowej podmiotów gospodarczych. Wskazuje on również na niedostatek narzędzi, które pozwalają w sposób ilościowy mierzyć rezultaty działań ukierunkowanych na wdrażanie koncepcji GOZ. Istniejące metody pomiaru dokonań w tym zakresie stosowane są przede wszystkim w analizach makroekonomicznych i dotyczą zazwyczaj całych branż i gałęzi przemysłu. Brakuje natomiast narzędzi, które mogłyby być stosowane w odniesieniu do konkretnego produktu lub usługi i uwzględniałyby szerokie spektrum aspektów związanych ze stosowaniem koncepcji GOZ. Zagadnienia te stanowią przedmiot badań podjętych w kolejnych rozdziałach niniejszej rozprawy.

3. CEL I ZAKRES PRACY

Analiza przeprowadzona w rozdziale 2 rozprawy wykazała, że wśród zidentyfikowanych ponad 200 definicji GOZ dominują te, które są zorientowane na aspekty ekonomiczne dotyczące organizacji i zarządzania procesowego (wykorzystują głównie dane makroekonomiczne), i możliwe jest dzięki nim ocenianie głównie zasobochłonności i odpadowości różnych branż przemysłu czy gałęzi gospodarki. Pewne wytyczne o charakterze technicznym, które mogą być traktowane jako ukierunkowanie na kształtowanie obiektów technicznych, wynikają z proponowanych w literaturze zasad wdrażania GOZ, nazywanych też często strategiami. Można z nich wyciągnąć ogólne zalecenia na temat możliwości zgodnego z zasadami GOZ kształtowania obiektów technicznych.

W związku właśnie z tym ogólnym charakterem ujmowania GOZ, pozostaje nadal stosunkowo niewielkie zainteresowanie wdrażaniem tej koncepcji przez podmioty gospodarcze. Firmy są co prawda stymulowane, m.in. przez politykę Unii Europejskiej, ale niewiele jest przykładów ich zintegrowanych i systemowych działań, które były odzwierciedleniem założeń koncepcji GOZ. Istnieją branże, w których podejmowanie inicjatyw z zakresu gospodarki o obiegu zamkniętym nie występuje, mimo ich potrzeby. Jedną z nich jest przemysł jachtowy, gdzie potrzeby wdrażania rozwiązań z zakresu cyrkularności produktów są wyraźnie widoczne.

Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, że jest jeszcze wiele obszarów dotyczących rozwoju i wdrażania koncepcji GOZ, które wymagają dalszych badań naukowych i prac rozwojowych. Istotną lukę badawczą stanowi brak narzędzi, które w sposób kompleksowy i ilościowy pozwoliłyby na pomiar tego, na ile działania inżynierskie związane z kształtowaniem i rozwojem obiektów technicznych, w tym środków transportu, są zbieżne z założeniami koncepcji GOZ. Lukę tę postanowiono wypełnić w niniejszej rozprawie. Za jej **cel główny** przyjęto opracowanie modelu oceny cyrkularności, który mógłby służyć analizie jednostek wpływających pod kątem ich zgodności z założeniami koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Jako **cyrkularność** rozumiano w pracy cechę obiektów technicznych, charakteryzującą ich potencjał do pozostawania w użytkowaniu (szerzej w obrocie gospodarczym), uwzględniając przy tym także ich stopień odpadowości lub status odpadu. Przyjęto również założenie, że opracowany model winien mieć taki potencjał, aby mógł być punktem wyjścia do prac nad zastosowaniem jego w szerszym zakresie – w odniesieniu do środków transportu, a w dalszej perspektywie, także do różnych kategorii obiektów technicznych. Aby osiągnąć tak sformułowany cel główny wyznaczono następujące cele szczegółowe:

- 1) wybór i scharakteryzowanie aspektów koncepcji GOZ, które powinny być ujęte w opracowanym modelu,
- 2) sformułowanie zależności, które pozwolą diagnozować poziom zgodności obiektów technicznych branży jachtowej z poszczególnymi aspektami koncepcji GOZ,

- 3) opracowanie wskaźnika, który będzie odzwierciedlał w sposób zintegrowany stopień spełnienia wszystkich aspektów koncepcji GOZ ujętych w modelu oceny cyrkularności,
- 4) zweryfikowanie na przykładzie wybranego jachtu poprawności opracowanego modelu oceny cyrkularności.

Cel pracy uznany zostanie za osiągnięty, gdy zrealizowane zostaną następujące, scharakteryzowane poniżej zadania. Pierwsze z nich (odpowiadające pierwszemu celowi szczegółowemu) to zebranie wytycznych dotyczących kształtowania obiektów technicznych w sposób zgodny z założeniami koncepcji GOZ. W tym zakresie postanowiono oprzeć się na zasadach (strategiach) wdrażania GOZ, na podstawie których dokonany będzie wybór aspektów istotnych z perspektywy kształtowania obiektów technicznych. Wśród zidentyfikowanych aspektów znalazły się przykładowo:

- efektywne wykorzystanie produktu,
- minimalizacja zużycia materiałów pierwotnych,
- ograniczenie uciążliwości środowiskowej,
- wykorzystanie recykulowanych komponentów.

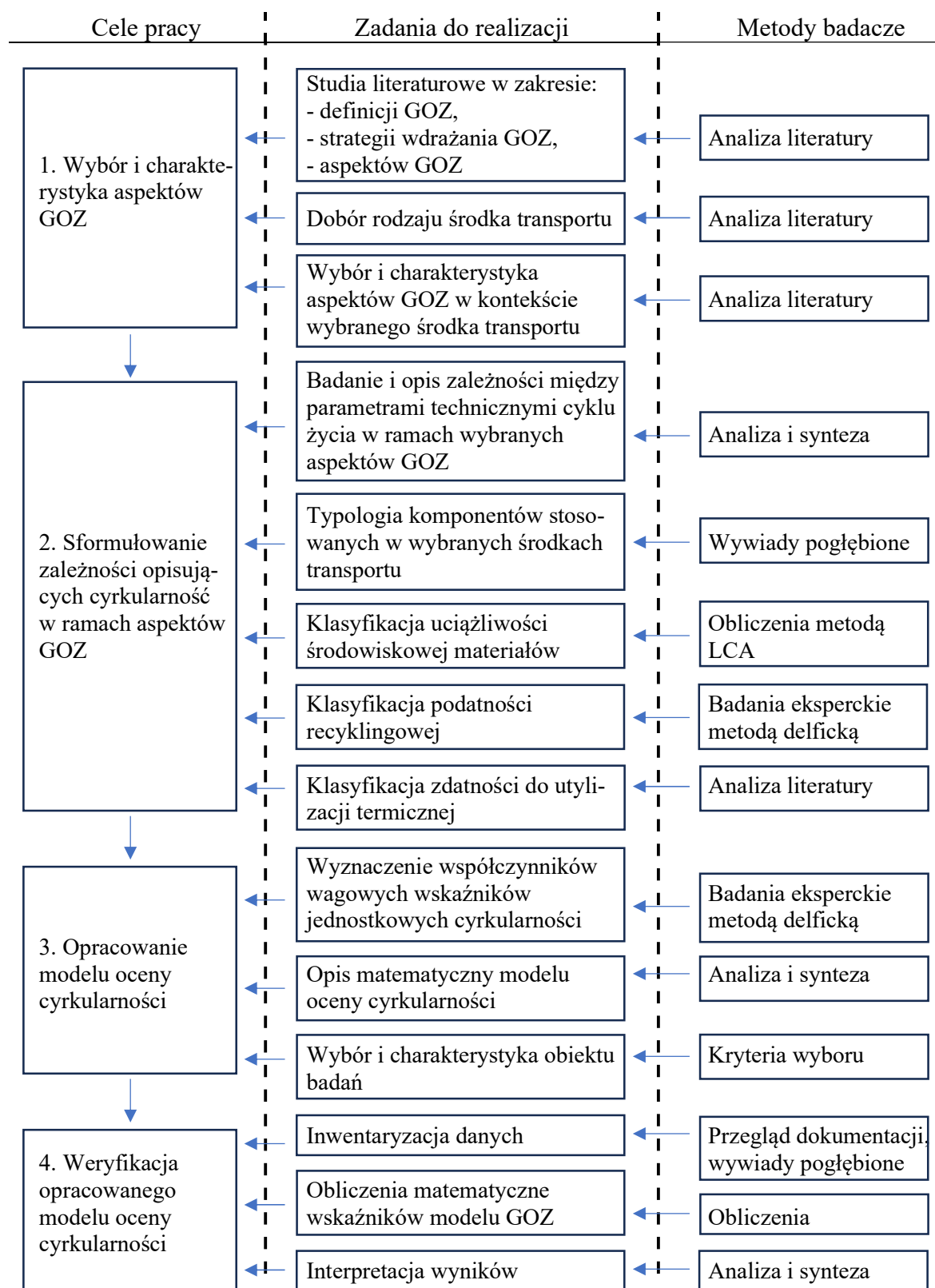
Drugi cel szczegółowy zostanie osiągnięty wraz ze sformułowaniem zależności matematycznych opisujących cyrkularność w związku z poszczególnymi aspektami GOZ. W ten sposób wyznaczone zostaną wskaźniki jednostkowe cyrkularności. W ramach realizacji przewiduje się opracowanie szeregu klasyfikacji niezbędnych do praktycznego wykorzystania modelu oceny cyrkularności. Będą one dostarczać informacji o takich aspektach, jak m.in.:

- uciążliwość środowiskowa użytych materiałów,
- zdolność do recyklingu,
- zdolność do utylizacji termicznej.

Kolejne zadanie przewidziane do realizacji (skorelowane z osiągnięciem trzeciego celu szczegółowego) jest ukierunkowane na zapewnienie możliwości interpretacji wyników oceny cyrkularności obiektów technicznych branży jachtowej. Polega ono na sformułowaniu jednego, sumarycznego wskaźnika, który w sposób zintegrowany odzwierciedli poziom spełnienia postulatów zawartych w koncepcji GOZ i który da możliwość przedstawienia rezultatów oceny cyrkularności w postaci jednej liczby.

Ostatni cel szczegółowy zostanie osiągnięty wraz z realizacją zadania polegającego na praktycznej weryfikacji opracowanego modelu oceny cyrkularności na przykładzie wybranego jachtu. Jego ocena ma pozwolić na identyfikację poziomu spełnienia celów wynikających z założeń koncepcji GOZ, zarówno w sposób szczegółowy (przez pryzmat różnych aspektów GOZ), jak i sumaryczny w formie jednego wskaźnika. Pozytywna weryfikacja możliwości wykorzystania w praktyce opracowanego modelu oceny cyrkularności będzie stanowić ostateczne kryterium osiągnięcia celu głównego rozprawy.

Cele badań przewidzianych do realizacji w rozprawie, przypisane im zadania oraz zastosowane metody badawcze zestawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Struktura celów i zadań wyznaczonych w rozprawie oraz zastosowanych w niej narzędzi i metod badawczych

4. MODEL OCENY CYRKULARNOŚCI

4.1. Podstawy modelu – analizowane aspekty

Przystępując do budowy modelu oceny cyrkularności produktów branży jachtowej za konieczne uznano w pierwszej kolejności zdefiniowanie zakresu merytorycznego problemów, które powinny być w ramach tego modelu analizowane. W pracach koncepcyjnych nad tym zagadnieniem inspirowano się informacjami zebranymi w rozdziale 2 rozprawy doktorskiej, a także rozwiązaniami dotyczącymi stosowania strategii wdrażania GOZ w praktyce gospodarczej. Szczegółowej analizie poddano następujące aspekty:

- A) intensywność użytkowania jachtu,
- B) zastosowanie materiałów pierwotnych w budowie jachtu,
- C) uciążliwość środowiskową materiałów stosowanych w jachcie,
- D) minimalizację masy jachtu i jego komponentów,
- E) pochodzenie komponentów jachtu,
- F) możliwość ponownego wykorzystania komponentów jachtu w innych jednostkach pływających,
- G) naprawialność jachtu i jego komponentów,
- H) potencjalne stosowanie procesów regeneracji (remanufacturingu) jachtu lub jego komponentów,
- I) możliwość przywrócenia jachtowi lub jego komponentom sprawności użytkowej w innym celu niż pierwotnie nadane im funkcje,
- J) zdolność do recyklingu materiałów wykorzystanych w konstrukcji jachtu i w jego komponentach,
- K) zdolność do utylizacji termicznej materiałów zastosowanych w konstrukcji jachtu i w jego komponentach.

Na potrzeby rozważań dotyczących wyboru aspektów GOZ, które winny być ujęte w opracowanym modelu cyrkularności oraz opisu samego modelu postanowiono sprecyzować, jak w rozprawie rozumiane są pojęcia:

- obiekt techniczny,
- komponent,
- cyrkularność.

Przyjęto, że obiekt techniczny to materialny przedmiot wytworzony przez człowieka o zróżnicowanej konstrukcji i określonej funkcji przeznaczony do eksploatacji [67]. Pod tym pojęciem kryją się zarówno maszyny, urządzenia, jak i ich komponenty lub zbiory komponentów – podzespoły [54, 83].

Komponent to zbiór elementów obiektu technicznego pełniących określoną funkcję [10], który w powiązaniu z innymi komponentami lub samodzielnie może krążyć w systemie gospodarczym poprzez naprawy, regeneracje, ponowne użycie lub remanufacturing [S.3].

Cyrkularność to pojęcie, które w odniesieniu do obiektu technicznego definiowane jest w literaturze na wiele różnych sposobów. Nie ma charakteru uniwersalnego i określane jest jako cecha mierzalna dotycząca konkretnych wskaźników. Znaczenie cyrkularności wyznacza dany wskaźnik, który ją mierzy [9]. W literaturze spotyka się też definicje, w których cyrkularność produktu jest sprowadzana do trzech wymiarów:

- wtórności materiałów, z których produkt jest wykonany,
- intensywności użytkowania produktu,
- maksymalizacji okresu utrzymywania wartości produktu [17, 77].

Na potrzeby niniejszej rozprawy cyrkularność przyjęto rozumieć jako cechę obiektu technicznego, charakteryzującą jego potencjał do pozostawania w użytkowaniu (szerzej w obrocie gospodarczym) z uwzględnieniem przy tym stopnia jego odpadowości lub statusu odpadu.

A) Intensywność użytkowania jachtu

Problem intensywności użytkowania jachtów wydaje się kluczowy z punktu widzenia gospodarki o obiegu zamkniętym, która kładzie nacisk m.in. na maksymalizację wykorzystania zasobów, przedłużanie cyklu życia oraz minimalizację odpadów i emisji. Niska intensywność użytkowania jachtu prowadzi m.in. do:

- niewykorzystywania w pełni potencjału zasobów – materiały i surowce użyte do budowy jachtu nie spełniają swojej funkcji użytkowej podczas postojów jachtu,
- degradacji technicznej – jachty rzadko użytkowane mogą ulegać przyspieszonemu niszczeniu, wymagając dodatkowych remontów i konserwacji,
- wzrostu kosztów utrzymania – koszty stałe (np. związane z postojami w portach, ubezpieczeniami i serwisowaniem) muszą być ponoszone niezależnie od poziomu wykorzystania.

To, na ile intensywnie użytkowany jest jacht, zależy od wielu czynników. Należą do nich m.in.:

- forma organizacyjna i finansowanie przyjęte przez armatora,
- lokalizacja akwenu,
- warunki pogodowe występujące w akwenach, gdzie użytkowany jest jacht,
- przeznaczenie jachtu,
- charakter konstrukcji,
- stan techniczny.

Poziom wykorzystania jachtu różni się w zależności od formy jego własności i organizacji sposobu korzystania z niego. Prywatni właściciele często kupują jacht, aby użytkować go sporadycznie i nie są zainteresowani wzrostem intensywności jego wykorzystania. Niektórzy dopuszczają okazjonalne wynajmowanie jachtu, promując swoją ofertę na portalach internetowych. Inaczej wygląda to, gdy właściciel nabywa jacht zakładając jego finansowanie z przychodów pochodzących z wynajmu. Jest to zazwyczaj realizowane we współpracy z profesjonalną firmą czarterującą jachty. Wykorzystuje się przy tym często model współdzielonej własności, gdzie zakup dokonywany jest wspólnie

z taką firmą. Zdarzają się również sytuacje, gdzie zakup jachtu jest dokonywany przez kilku właścicieli [I.13].

Na poziom wykorzystania jachtu istotnie wpływa również miejsce, gdzie ma on być użytkowany. Ma to szczególne znaczenie przy jachtach o mniejszej „dzielności morskiej”, które ze względu na swoje ograniczenia nie mogą być eksploatowane na wszystkich rodzajach akwenów. Popularne regiony żeglarskie, jak Morze Śródziemne czy Karaibskie, sprzyjają intensywnej eksploatacji. Ma to związek m.in. z dostępnością marin i serwisów technicznych oraz poziomem skomplikowania nawigacyjnego. Umiejscowienie akwenów, na których jacht ma być wykorzystywany, wyznacza również warunki atmosferyczne, które wpływać mogą na intensywność eksploatacji. W strefach umiarkowanych i chłodniejszych sezon żeglarski jest ograniczony do miesięcy letnich, natomiast w klimatach tropikalnych żeglowanie może odbywać się przez cały rok.

Jachty mogą być używane w różnych celach: rekreacyjnych, sportowych, transportowych, szkoleniowych czy ekspedycyjnych. Jednostki rekreacyjne udostępniane w ramach czarteru są zwykle intensywniej użytkowane niż te, które są kupowane prywatnie do samodzielnego wykorzystywania przez właścicieli. Poziom wykorzystania jachtów wyczynowych z perspektywy czasu ich użytkowania może być niski, ale podczas eksploatacji taki jacht podlega zazwyczaj dużym obciążeniom. Dotyczy to zarówno jednostek sportowych, jak i ekspedycyjnych.

Poziom wykorzystania jachtu jest wyznaczony pośrednio również przez założenia konstrukcyjne. To one determinują jego zdolność do żeglugi w różnych warunkach atmosferycznych. Jachty oceaniczne, zbudowane z myślą o długich rejsach i trudnych warunkach, mogą być użytkowane intensywniej niż jednostki rekreacyjne przeznaczone do okazjonalnych, krótkich rejsów sezonowych. Z założeniami konstrukcyjnymi wiążą się materiały i technologie użyte do budowy jachtu, a te wpływają na jego trwałość i niezawodność.

Zarówno wymienione aspekty, jak i regularna konserwacja oraz jakość wykonania jachtu wpływają natomiast na jego gotowość do użytkowania. Zaniedbania podczas eksploatacji w zakresie obsługi oraz serwisowania mogą prowadzić do awarii i konieczności długotrwałych remontów, co ogranicza czas gotowości do użytkowania i tym samym czas użytkowania jachtu. Stąd jachty w dobrym stanie technicznym, regularnie serwisowane, są użytkowane częściej i bardziej intensywnie.

Z perspektywy GOZ, ograniczenie przestojów jachtu, a tym samym zwiększenie intensywności jego użytkowania stanowi kluczowy cel dla poprawy zrównoważonego zarządzania zasobami. W sytuacjach założenia potencjalnie niskiego poziomu wykorzystania jachtu (na etapie jego projektowania) zasadne wydaje się ponowne przemyślenie koncepcji jachtu i opracowywanie nowych sposobów dostarczania funkcjonalności użytkownikom przez zmianę założeń projektowych, adaptację jachtu do nowych zastosowań czy stosowanie modułowych komponentów umożliwiających łatwą i szybką wymianę, modernizację oraz dostosowanie do zmieniających się potrzeb użytkowników. Takie podejście może pozwolić na bardziej efektywne wykorzystanie zasobów oraz minimalizację odpadów przez wydłużenie cyklu życia nie tylko całego jachtu, ale dodatkowo również jego komponentów. Istotne wydaje się z tej perspektywy umożliwienie nie tylko personalizacji jachtu według indywidualnych preferencji

użytkowników, ale także umożliwienie jego przebudowy i dostosowania do zmieniających się oczekiwań.

Przemyślenie koncepcji jachtu nie powinno się jednak ograniczać do zagadnień technicznych. Powinno ono być rozszerzone o kwestie biznesowe, w tym np. rozważenie modeli współdzielenia i wynajmowania jachtu zamiast tradycyjnej własności. Rozwój platform internetowych umożliwiających wynajem jachtów, ich współużytkowanie lub leasing długoterminowy pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie dostępnych jednostek. To natomiast powinno przekładać się na zmniejszenie liczby nowych jachtów, a tym samym – redukcję zużycia surowców i negatywnego wpływu jachtów na środowisko w skali globalnej.

B) Zastosowanie materiałów pierwotnych w budowie jachtu

Redukcja udziału materiałów pierwotnych (materiałów wytwarzanych w oparciu o surowce naturalne pozyskiwane bezpośrednio ze środowiska, które nie zostały wcześniej przetworzone ani użyte) w budowie jachtu jest czynnikiem przyczyniającym się w istotny sposób do wzrostu jego cyrkularności. Ograniczenie użycia tych materiałów przyczynia się jednocześnie do zmniejszenia negatywnego wpływu jachtu na środowisko w ujęciu całego jego cyklu życia. Użycie materiałów pierwotnych jest jednak często niezbędne w budowie kluczowych elementów jachtu. Trudno sobie przykładowo wyobrazić, aby z rynku miały zniknąć stalowe i aluminiowe kadłuby jachtów. W wielu sytuacjach wydają się one nie do zastąpienia ze względu na takie cechy, jak wytrzymałość, trwałość czy odporność na działanie środowiska morskiego. Spośród materiałów pierwotnych w konstrukcji współczesnych jachtów wykorzystuje się przede wszystkim metale, drewno, kompozyty oparte na produktach przemysłu petrochemicznego i górniczego oraz tworzywa sztuczne.

Metale stanowią podstawowy surowiec stosowany w konstrukcji kadłubów, masztów, okuć i osprzętu jachtowego. Do najczęściej wykorzystywanych należą [55]:

- stale nierdzewne (o różnej strukturze krystalicznej i różnych dodatkach stopowych) – charakteryzują się wysoką odpornością na korozję oraz trwałością; znajdują zastosowanie w budowie elementów konstrukcyjnych, relingów, knag oraz osprzętu pokładowego,
- stopy aluminium (pozyskiwane przez wydobywanie rud boksytu a następnie ich przetwarzanie) – zapewniają lekkość konstrukcji jachtów i są wykorzystywane głównie w budowie elementów konstrukcyjnych, w tym kadłubów i masztów,
- stale węglowe (stopy żelaza z węglem i innymi dodatkami stopowymi; ich produkcja zaczyna się od wydobywania rudy żelaza) – w przemyśle jachtowym stosuje się je głównie do budowy kadłubów w jednostkach oceanicznych i ekspedycyjnych ze względu na wysoką trwałość i wytrzymałość mechaniczną,
- stopy tytanu (rzadziej stosowane) – wyróżniają się wyjątkową odpornością na korozję i lekkością, co czyni je materiałami nadającymi się do produkcji specjalistycznego osprzętu jachtowego.

Drugą kategorię materiałów pierwotnych stosowanych w budowie jachtów stanowi drewno. Jest ono głównym budulcem elementów wykończeniowych jachtów. Najczęściej

wykorzystywane gatunki cechują się wysoką odpornością na wilgoć i trwałością. Drewno stosowane w jachtingu pochodzi głównie z lasów tropikalnych oraz plantacji drzewnych rosnących w klimatach umiarkowanych. Do najczęściej stosowanych w budowie jachtów należą:

- tek – cechuje go wysoka odporność na wodę morską oraz naturalne właściwości antypoślizgowe, dlatego jest często wykorzystywany na pokładach,
- mahoń – stosuje się go w konstrukcjach drewnianych oraz w wykańczaniu luksusowych wnętrz,
- dąb – używany jest głównie w konstrukcjach klasycznych jachtów drewnianych oraz w elementach dekoracyjnych.

Nowoczesne jachty, zwłaszcza produkowane seryjnie, są wykonywane głównie z kompozytów, które bazują na materiałach pierwotnych pochodzących z przemysłu petrochemicznego i górnictwa. Do najczęściej stosowanych należą:

- żywice poliestrowe i epoksydowe – pozyskiwane z ropy naftowej, zapewniają odporność na wodę i dobre właściwości mechaniczne,
- włókna szklane – powstają z surowców mineralnych (jak piasek kwarcowy), a stosowane są do wzmacniania konstrukcji laminatów jachtowych,
- włókna węglowe – stanowią one syntetyczny materiał o wysokiej wytrzymałości i lekkości, który stosowany jest w masztach i kadłubach jachtów regatowych,
- pianki rdzeniowe (PVC, PET) – stosowane są w konstrukcjach typu „sandwich” w celu zwiększenia sztywności i zmniejszenia masy jachtu.

Istotną rolę w budowie nowoczesnych jachtów mają też tworzywa sztuczne. Zapewniają one lekkość konstrukcji, odporność na działanie środowiska morskiego i łatwość formowania w skomplikowane struktury. Wiele z nich cechuje jednak niska podatność na recykling.

Obniżenie ilości materiałów pierwotnych używanych w budowie jachtów stanowi jedno z kluczowych wyzwań z perspektywy GOZ. Przykładami działań ukierunkowanych na osiągnięcie tego celu są:

- zastępowanie materiałów pierwotnych surowcami wtórnymi (recykling aluminium i stali pozwala zmniejszyć emisję CO₂ i ograniczyć wydobycie rud),
- stosowanie alternatywnych materiałów (np. biokompozyty lub drewno zrównoważone /certyfikowane FSC/ zamiast drewna tropikalnego),
- projektowanie modułowe (umożliwia ponowne wykorzystywanie komponentów zamiast produkcji nowych).

C) Uciążliwość środowiskowa materiałów stosowanych w budowie jachtu

Jak wynika z informacji przytoczonych w rozdziale 2.1, jednym z głównych celów gospodarki o obiegu zamkniętym jest minimalizacja wpływu produktu na środowisko przez optymalizację wykorzystania zasobów, wydłużenie cyklu życia materiałów i maksymalizację odzysku surowców. Optymalizacja wykorzystania zasobów w kontekście minimalizacji wpływu na środowisko oznacza m.in. dobór takich materiałów, które będą się cechowały możliwie niskim poziomem negatywnego oddziaływania na środowisko. Poziom tego oddziaływania może być wyznaczony dla danego materiału i

określa wielkość wpływu tego materiału na środowisko w całym cyklu jego życia – od wydobycia surowców po recykling lub utylizację [43].

Poznanie poziomu uciążliwości środowiskowej materiałów w zestawieniu z danymi ilościowymi o tych materiałach jest jednym ze sposobów kwantyfikacji oddziaływań środowiskowych obiektu technicznego. Pozwala na identyfikację najbardziej obciążających elementów konstrukcji, a co za tym idzie – określenie działań zmniejszających ich negatywny wpływ.

Uciążliwość środowiskowa jachtu w kontekście materiałów, z których jest on zbudowany, odnosi się do sumy negatywnych oddziaływań środowiskowych wynikających z zastosowanych materiałów w całym cyklu życia jednostki – od wydobycia surowców, przez produkcję, użytkowanie, aż po utylizację lub recykling. Materiały użyte w konstrukcji jachtu mają istotny wpływ na jego środowiskową charakterystykę [56] m.in. dlatego, że:

- wyznaczają parametry procesów produkcyjnych, w tym m.in. ich energochłonność – materiały o wysokiej energochłonności (np. kompozyty, aluminium) generują większe negatywne oddziaływanie na środowisko niż te o niższej energochłonności (np. drewno, stal pochodząca z recyklingu),
- decydują o możliwości recyklingu i ponownym wykorzystaniu – metale mogą być przetwarzane wielokrotnie, natomiast kompozyty są praktycznie niezdatne do recyklingu,
- wpływają na trwałość jachtu oraz rodzaj i zakres prac konserwacyjnych – materiały o dużej trwałości (np. stal) użyte w konstrukcji jachtu wymagają odnawiania powłok ochronnych, co generuje dodatkowe obciążenie środowiskowe, ale są też takie, które cechuje większa odporność na środowisko morskie (np. aluminium, drewno tekowe).

W literaturze można znaleźć szereg różnych propozycji sposobów wyznaczania uciążliwości środowiskowej materiałów. Najbardziej zaawansowane i zapewniające wiarygodne wyniki mają swoje źródło w analizach opartych na wykorzystaniu metody LCA (*Life Cycle Assessment*) [6]. Wykorzystanie jej w praktyce jest jednak procesem skomplikowanym i trudnym do stosowania przez kadrę inżynierską podejmującą decyzje o wykorzystaniu takiego czy innego materiału w konstrukcji obiektu technicznego [41]. Do takich zastosowań zdecydowanie bardziej nadaje się klasyfikacja materiałowa Wimmera opracowana na potrzeby narzędzia Ecodesign Pilot, które adresowane jest m.in. dla kadry inżynierskiej [100].

Klasyfikacja materiałowa Wimmera [100], służy do systematycznego porządkowania materiałów ze względu na ich wpływ na środowisko oraz możliwości zastosowania w procesach projektowania ekologicznego. Podstawowe założenia i cele tej klasyfikacji obejmują podział materiałów na klasy (I–VIII) na podstawie takich kryteriów jak:

- rodzaj materiału (np. metale, drewno, tworzywa sztuczne, szkło),
- podział na materiały pierwotne i wtórne, udział materiałów wtórnych w danej klasie,
- potencjał odzysku i zachowanie właściwości podczas wielokrotnego przetwarzania,

- zdolność materiału do zachowania funkcjonalności w różnych warunkach,
- ilość energii potrzebnej do wytworzenia materiału,
- obecność szkodliwych składników chemicznych i ich potencjalny wpływ na środowisko.

Podstawowy podział materiałów zgodnie ze wspomnianą wyżej klasyfikacją przedstawiono w tabeli 4.1.

Tab. 4.1. Klasyfikacja uciążliwości środowiskowej materiałów wg W. Wimmera [100]

Mate- riał Klasa	Metale	Tworzywa sztuczne	Inne materiały
I			Beton Drewno konstrukcyjne Gips
II	Stal elektryczna (wtórna) Aluminium (wtórne) Blacha stalowa (90% z recyklingu)		Porcelana Szkło, butelki itp. (100% z recyklingu) Szkło, butelki itp. (88% z recyklingu) Szkło płaskie (float) Włókno szklane Szkło, butelki itp., brązowe (61% z recyklingu) Szkło, butelki itp., zielone (99% z recyklingu) Szkło, butelki itp., przezroczyste (55% z recyklingu) Linoleum Karton Papier (100% z recyklingu) Szkło, butelki itp. (pierwotne)
III	Stal (80% pierwotna) Stal (83% pierwotna) Stal (89% pierwotna) Stal z technologii górnego nadmuchu (pierwotna) Stal niskostopowa		Papier (65% z recyklingu) Skóra Guma, zielona, surowa Papier wolny od chloru Płyn chłodzący R134a Amoniak NH ₃ Olej opałowy Benzyna bezołowiowa
IV	Żeliwo	PVC, nieszttywne	Guma

	Blacha stalowa ocynkowana Staliwo	PVC PVC, sztywny PVC, wysoka uderzalność HDPE PP LDPE PPE/PS PS (EPS), rozszerzalny PS (HIPS), duży wpływ PS (GPPS), ogólnego przeznaczenia PET, żywica PET PET, folie PET, na butelki SAN	Guma, polibutadien Guma, EPDM Guma, naturalna Guma, SBR
V	Miedź (wtórna) Ołów (50% pierwotny) Żelazochrom (53% Cr)	PB ABS PE, pianka Pianka PUR, HR PVDC PU, niesztynny PUR, pianka elastyczna PUR, pianka półsztywna PUR, pochłaniający energię PMMA (akryl) PC PA 6.6 (nylon) EP (żywica epoksydowa) PA (nylon)	Tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem szklanym (TWS) Techniczny materiał ceramiczny
VI	Stal, V2A: 18%Cr, 9%Ni Stal, V4A: 17% Cr, 12% Ni Żelazonikiel (33% Ni) Stopy cynku Aluminium (58% pierwotne) Aluminium (70% pierwotne) Stopy aluminium Aluminium (pierwotne) Stal wysokostopowa (nierdzewna) Chrom Stopy magnezu		Włókno węglowe

	Miedź (50% pierwotna) Miedź (60% pierwotna) Miedź (65% pierwotna) Miedź, kable Miedź (pierwotna) Stopy miedzi, mosiądz Proszek metalowy		
VII	Stopy tytanu Stopy miedzi Cynk Stopy miedzi, brąz Nikiel i stopy niklu		
VIII	Srebro Pallad Platyna Złoto Rod		

Jak wynika z tabeli 4.1, Wimmer przypisuje różne materiały do ośmiu klas (I – VIII), gdzie przede wszystkim:

- I klasa obejmuje materiały o niskiej uciążliwości środowiskowej (np. beton, drewno lite),
- II klasa zawiera materiały wtórne o niskim wpływie (np. stal wtórna, aluminium wtórne, szkło z recyklingu),
- III klasa obejmuje metale pierwotne o średnim wpływie (np. stal 80% pierwotna),
- IV klasa dotyczy tworzyw sztucznych powszechnego użytku (np. PVC, PET, HDPE),
- V klasa zawiera tworzywa o wysokiej uciążliwości oraz metale częściowo pierwotne (np. ABS, poliuretany, epoksydy, ołów 50% pierwotny),
- VI klasa obejmuje wysokostopowe metale i kompozyty (np. aluminium 70% pierwotne, włókno węglowe),
- VII klasa zawiera metale rzadkie i specjalistyczne stopy (np. tytan, stopy niklu),
- VIII klasa obejmuje metale szlachetne (np. złoto, srebro, platyna).

Klasyfikacja Wimmera stała się punktem wyjścia do opracowania sposobu wyznaczania wskaźnika uciążliwości środowiskowej materiałów, który został szerzej scharakteryzowany w rozdziale 4.2.4 rozprawy.

D) Minimalizacja masy jachtu i jego komponentów

Redukcja masy jachtu w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym wiąże się z optymalizacją zużycia surowców, ale również pośrednio z poprawą efektywności energetycznej oraz zmianami w zakresie możliwości recyklingu materiałów. Zmniejszenie masy jachtu ogranicza zapotrzebowanie na surowce, a ponadto potencjalnie może prowadzić do zużywania mniejszej ilości paliwa, a tym samym do redukcji emisji

spalin (w przypadku jachtów z napędem spalinowym) i poprawy efektywności ekologicznej w całym cyklu życia.

Masa każdej jednostki pływającej jest jednak jednym z kluczowych parametrów konstrukcyjnych i nie można dążyć do tego, żeby była możliwie najmniejsza, ani największa. Nie jest bowiem tak, że co do zasady jacht powinien być jak najlżejszy, gdyż w pewnych sytuacjach ograniczenie masy może wpłynąć niekorzystnie na szereg innych parametrów, np. na stateczność. Nie jest też jednak prawdą, że jacht powinien być możliwie najcięższy, przykładowo dlatego, że do napędu ciężkiego jachtu potrzebna jest duża ilość surowców energetycznych.

Z perspektywy parametrów technicznych masa jachtu wpływa na jego hydrodynamikę, stateczność, bezpieczeństwo, nośność i zachowanie na wodzie. Mimo, że traktuje się ją często jako podstawowy parametr konstrukcyjny, to jest ona parametrem wtórnym, wynikającym z trzech głównych czynników: konstrukcji kadłuba, wielkości jachtu oraz zastosowanych materiałów.

Co do zasady masa jachtu rośnie wraz z jego wielkością, jednak zależność ta nie jest liniowa – wzrost długości kadłuba powoduje wzrost masy w przybliżeniu z trzecią potęgą jego długości [52]. W małych jachtach dostrzega się istotny wpływ zastosowanego materiału kadłuba na masę jednostki. Przykładowo mały jacht, którego kadłub jest wykonany z kompozytów, będzie znacznie lżejszy niż jacht z kadłubem stalowym. W miarę wzrostu wielkości jachtu różnice pomiędzy masą kadłubów o porównywalnych parametrach, wykonanych z różnych materiałów są coraz mniejsze.

Niezależnie od rodzaju zastosowanego materiału, masa jachtu wpływa na wiele aspektów jego funkcjonowania. Należą do nich m.in. [65]:

- hydrodynamika – interakcja jachtu z wodą, wpływająca na opory hydrodynamiczne, prędkość i efektywność żeglugi,
- stabilność konstrukcji – rozmieszczenie masy i jej wpływ na sztywność kadłuba, zapewniające wytrzymałość konstrukcji,
- stateczność jachtu – zdolność jednostki do zachowania równowagi i odporności na przechyły, kluczowa dla bezpieczeństwa na fali,
- efektywność paliwowa – zużycie paliwa i zasięg jednostki, determinowane przez opory hydrodynamiczne i masę jachtu,
- nośność – zdolność jachtu do przewożenia ładunku, zapasów i pasażerów, wpływająca na funkcjonalność eksploatacyjną,
- komfort użytkowania – zdolność jednostki do tłumienia ruchów na fali oraz wygoda manewrowania w różnych warunkach,
- trwałość – odporność jachtu na zużycie i uszkodzenia mechaniczne, wpływająca na długowieczność konstrukcji,
- wytrzymałość konstrukcji – zdolność jednostki do przenoszenia obciążeń strukturalnych i zachowania integralności kadłuba,
- koszty eksploatacji – wydatki związane z użytkowaniem, konserwacją i serwisowaniem jachtu.

Ocena możliwości zredukowania masy jachtu jako zagadnienia ważnego z perspektywy gospodarki o obiegu zamkniętym wydaje się istotna w dwóch sytuacjach.

Pierwsza to etap formułowania założeń projektowych dotyczących nowej jednostki pływającej, które są efektem procesów decyzyjnych podejmowanych przez armatora, ale przy udziale projektantów. Druga to sytuacja, w której planuje się duże modyfikacje jachtu (np. przy okazji remontu). W obu przypadkach może być zastosowany sposób określenia potencjalnej redukcji masy jachtu lub jego komponentu, co przedstawiono w rozdz. 4.2 niniejszej rozprawy.

E) Pochodzenie komponentów jachtu

Z punktu widzenia gospodarki o obiegu zamkniętym zagadnienie pochodzenia elementów jakiegokolwiek obiektu technicznego wydaje się mieć istotne znaczenie. W przypadku jachtu, jego komponenty mogą być nowe, ale mogą też pochodzić z innych wcześniej już eksploatowanych jednostek. Drugi z wymienionych wariantów jest szczególnie korzystny z perspektywy środowiskowej i może być stosowany w przypadku modernizacji już istniejących jachtów lub budowy nowych jednostek pływających. Jego stosowanie ma szereg ograniczeń, które wynikają z konieczności spełnienia wielu wymagań, takich jak np.:

- kompatybilność,
- odpowiedni stan techniczny,
- trwałość,
- wpływ na stateczność,
- niezawodność i bezpieczeństwo,
- przepisy prawne,
- możliwość adaptacji i montażu na jachcie.

Używane komponenty powinny odpowiadać wymaganiom wynikającym ze specyfiki konstrukcji jachtu (nowego lub modernizowanego), w którym mają być zastosowane. Pożądane jest bowiem m.in. ograniczenie konieczności nadmiernych modyfikacji. Przed ponownym wykorzystaniem każdy komponent winien zostać poddany szczegółowej weryfikacji w celu oceny jego stanu technicznego, w tym analizie stopnia zużycia, identyfikacji potencjalnych uszkodzeń oraz ocenie możliwości dalszej eksploatacji. Ponieważ użycie każdego komponentu nie powinno negatywnie wpływać na stabilność jachtu, zasadne jest w wielu przypadkach dokonanie oceny wpływu na położenie środka ciężkości jednostki oraz na jej stateczność dynamiczną i statyczną. Weryfikacji powinny podlegać również inne aspekty związane z wykorzystywaniem w konstrukcji używanych podzespołów, a szczególnie spełnienie norm z zakresu bezpieczeństwa (m.in. dlatego, że wymagania normatywne mogą się zmieniać) i zapewnienie zgodności z obowiązującymi regulacjami technicznymi i standardami klasyfikacyjnymi.

F) Możliwość ponownego wykorzystania komponentów jachtu w innych jednostkach pływających

Z punktu widzenia gospodarki o obiegu zamkniętym możliwość ponownego wykorzystania komponentów jednostki pozwala znacznie ograniczyć odpadowość po zakończeniu jej eksploatacji. Jednocześnie wydłuża ona cykl życia poszczególnych komponentów, które mogą być użyte w innych jednostkach. Przekłada się to na oszczędność surowców, ponieważ zmniejsza zapotrzebowanie na nowe materiały do budowy kolejnych jednostek. Ma to również pozytywny wpływ na redukcję negatywnych obciążeń środowiskowych, które towarzyszą produkcji nowych komponentów oraz ich późniejszej utylizacji. Dodatkową korzyścią jest ograniczenie kosztów, ponieważ ponowne wykorzystanie dobrze zachowanych elementów, jak przykładowo silniki czy systemy nawigacyjne, pozwala obniżyć koszty modernizacji używanych jachtów lub nawet produkcji nowych jednostek.

Istotne z tej perspektywy są zagadnienia modułowości konstrukcji i standaryzacji elementów składowych jachtu. W niniejszej rozprawie jacht jest traktowany jako zbiór różnych komponentów, których klasyfikację zaproponowano w rozdziale 4.3. Są one podzielone przede wszystkim ze względu na funkcje, jakie pełnią oraz charakter konstrukcji. Im bardziej konstrukcja jachtu ma charakter modułowy oraz użyte są w nim standaryzowane części, tym większy jest potencjał wykorzystania jego elementów w innych jachtach.

Istotną kwestią przy rozpatrywaniu możliwości wykorzystania komponentów jachtu w innych jednostkach pływających jako wskaźnika proponowanego w rozprawie jest też to, aby używane komponenty nie wymagały naprawy, regeneracji czy jakiegokolwiek przetworzenia. Muszą one jednak spełniać określone wymogi techniczne, a czasami również wymogi normatywne analogicznie do tych, jak określono to omawiając kwestię pochodzenia komponentów jachtu.

G) Naprawialność jachtu i jego komponentów

Naprawa to proces techniczny polegający na przywróceniu pierwotnej funkcjonalności i sprawności eksploatacyjnej obiektowi technicznemu, który uległ uszkodzeniu, zużyciu lub awarii [16]. Istotą naprawy jest eliminacja uszkodzenia, które zakłóca prawidłowe działanie obiektu, przy jednoczesnym zachowaniu jego konstrukcji, parametrów technicznych oraz funkcjonalności użytkowej. Naprawa nie obejmuje działań związanych z regeneracją (remanufacturingiem) lub odnawianiem (refurbishingiem), a jej zakres nie wpływa na całościową strukturę obiektu ani nie zmienia jego właściwości mechanicznych czy eksploatacyjnych [38].

Naprawialność jest natomiast rozumiana jako cecha obiektu technicznego, która określa jego potencjał w zakresie przywrócenia pełnej sprawności eksploatacyjnej [N.6]. Naprawialność odzwierciedla wysoki standard konstrukcji technicznej, wpływając korzystnie na możliwości dokonania pełnej konserwacji, naprawy lub wymiany elementu lub podzespołu obiektu technicznego na nowy.

W przypadku jachtu naprawy mogą obejmować różne rodzaje działań zależnie od rodzaju komponentu i stopnia jego zużycia. Przykładowo, komponenty związane z konstrukcją kadłuba (np. pęknięcia laminatu w jachtach kompozytowych lub korozja w jednostkach stalowych) mogą wymagać naprawy uszkodzeń mechanicznych. Taka naprawa może obejmować uzupełnianie ubytków, wzmacnianie konstrukcji lub nakładanie nowych warstw ochronnych.

W przypadku systemów funkcjonalnych, takich jak napęd czy instalacje elektryczne praktykuje się często wymianę uszkodzonych elementów składowych, aby np. przywrócić pełną sprawność systemów sterowania. Silniki mogą wymagać przykładowo czyszczenia, wymiany uszczelnień, naprawy układów paliwowych czy turbosprężarek. Naprawy systemów elektrycznych i hydraulicznych często polegają na wymianie przewodów czy konserwacji pomp.

Komponenty wyposażeniowe, takie jak meble, systemy sanitarne czy żagle, mogą wymagać mniej skomplikowanych napraw, takich jak wymiana zużytych elementów, poprawa estetyki czy przywrócenie pełnej funkcjonalności okuć i mechanizmów.

Z perspektywy gospodarki o obiegu zamkniętym, której celem jest maksymalizacja wykorzystania zasobów przez wydłużenie cyklu życia produktów, naprawianie obiektu technicznego jest procesem korzystnym. W kontekście jachtów oznacza to dążenie do jak najdłuższego użytkowania zarówno jednostki jako całości, jak i jej poszczególnych komponentów (np. kadłuba, systemów napędowych, instalacji elektrycznej czy osprzętu żeglarskiego).

Komponenty jachtowe wykonane z materiałów kompozytowych są szeroko stosowane w budowie nowoczesnych jachtów, mimo że mają bardzo długi czas rozkładu. Ich utylizacja jest kosztowna i problematyczna dla środowiska. Stąd też zasadne jest podejmowanie prób naprawy takich komponentów, gdyż zmniejsza to ilości generowanych odpadów przemysłowych, które są trudne do zagospodarowania.

Proces naprawy powinien zwiększyć trwałość jachtu, która jest określana jako zdolność do eksploatacji w określonym czasie bez utraty kluczowych parametrów technicznych i użytkowych. Trwałość jachtu określona przez projektanta jest wartością teoretyczną, która zależy od wielu czynników, takich jak zastosowane materiały, technologia budowy czy warunki eksploatacji. Podczas gdy trwałość materiałów i konstrukcji wyznacza granice eksploatacyjne jachtu, regularne naprawy pozwalają na jej wydłużenie przez przywracanie sprawności poszczególnym komponentom.

H) Stosowanie procesów regeneracji (remanufacturingu)

Regeneracja jest procesem ukierunkowanym na zapewnienie uszkodzonym lub zużytym obiektom technicznym potencjału do wykorzystania w znaczeniu gospodarczym. Na potrzeby niniejszej pracy przyjęto, że jest to sformułowanie równoznaczne z odbudową i remanufacturingiem. Chodzi w niej nie tyle o zwykłą naprawę, ale o doprowadzenie obiektu technicznego do pierwotnego stanu, aby mógł on powrócić na rynek i być przedmiotem obrotu gospodarczego.

Remanufacturing jachtów polega na kompleksowej odbudowie jednostki pływającej, która nie tylko przywraca jej pełną funkcjonalność, ale też często wprowadza

udoskonalenia technologiczne. Zakłada on dogłębną odbudowę całych systemów jachtowych z zastosowaniem zarówno oryginalnych (ponownie użytych), jak i nowych komponentów. W przeciwieństwie do klasycznej naprawy, w której chodzi o przywrócenie sprawności wybranym komponentom, remanufacturing obejmuje pełną rekonstrukcję jednostki pływającej. Dzięki temu odnowiony jacht osiąga parametry techniczne porównywalne z nową jednostką i podobnie jak ona musi spełniać wszystkie wymagania techniczne obowiązujące dla nowych jachtów.

Proces remanufacturingu obejmuje takie kolejne działania jak:

- diagnoza i ocena jednostki – identyfikacja zakresu prac do wykonania oraz analiza strukturalna,
- demontaż i selekcja komponentów i ich elementów składowych – wytypowanie elementów do ponownego wykorzystania i tych, które wymagają naprawy lub muszą zostać zastąpione elementami nowymi,
- rekonstrukcja jednostki – realizacja napraw i przygotowanie zdalnych do wykorzystania elementów oraz montaż z możliwym wykorzystaniem innowacyjnych rozwiązań w odbudowywanej jednostce,
- testy i certyfikacja – przeprowadzenie procesów regulacji, testów i prób ukierunkowanych na potwierdzenie spełnienia standardów porównywalnych do nowej jednostki.

Z perspektywy gospodarki o obiegu zamkniętym remanufacturing jest efektywnym sposobem realizacji celów środowiskowych, umożliwiającym maksymalne wykorzystanie istniejących zasobów i wydłużającym cykl życia obiektów. Tak też jest w odniesieniu do jachtów lub ich komponentów, gdzie remanufacturing obejmuje kompleksową rekonstrukcję jachtu (lub komponentu jachtu), przywracającą jego parametry techniczne, operacyjne i bezpieczeństwa do poziomu nowej jednostki. Proces remanufacturingu z założenia znacząco wydłuża trwałość jachtu, gdyż podejmuje się go w odniesieniu do jednostek pływających w zaawansowanym stadium eksploatacji. Spodziewać się można, że proces remanufacturingu może nawet dwukrotnie wydłużyć trwałość jachtu [36, 37].

1) Przywracanie sprawności użytkowej w celu przeznaczenia do innych funkcji niż pierwotnie nadane

Z perspektywy założeń gospodarki o obiegu zamkniętym każda forma zagospodarowania zużytego obiektu technicznego po zakończeniu jego eksploatacji jest korzystna. Tak jest też w przypadku nadania nowej funkcji istniejącym jachtom lub ich komponentom. W przeciwieństwie do koncepcji „reuse” (ponownego wykorzystania obiektu pod warunkiem, że będzie on pełnił tę samą funkcję) oraz „remanufacturing” (kompleksowa odbudowa ukierunkowana na przywrócenie pierwotnych właściwości), nadanie nowej funkcji jachtom lub ich komponentom jest poprzedzone procesem naprawy ukierunkowanym na spełnienie z założenia nowych wymagań wynikających z perspektywy przypisania im nowego przeznaczenia. W literaturze angielskojęzycznej proces ten nazywany jest „repurpose”.

To, w jakim charakterze będą ponownie wykorzystywane jachty lub ich komponenty, zależy w dużej mierze od kreatywności i wyobraźni projektantów. Zarówno chodzi tu o projektantów projektujących pierwotny jacht (tych, którzy powinni planować sposób zagospodarowania zużytego jachtu lub komponentu), jak i tych, którzy projektują nowe (różnego rodzaju) obiekty techniczne i mogą brać pod uwagę wykorzystanie zużytego jachtu lub jego komponentów.

Rozważania dotyczące możliwości ponownego użycia jachtu lub jego komponentów nie mogą być ujęte w ściśle określone ramy o charakterze procedur, gdyż mają one charakter twórczy i wymagają indywidualnego podejścia. Wynika to m.in. z szeregu ograniczeń o charakterze technicznym i funkcjonalnym, które wpływają na to, w jaki sposób jacht lub jego komponenty mogą być ponownie użyte. Te ograniczenia wynikają przykładowo:

- ze zmian właściwości materiałowych – wiele materiałów traci swoje pierwotne właściwości w trakcie procesu eksploatacji, co ogranicza możliwości ich zastosowania do pełnienia nowych funkcji; przykładowo, laminaty kompozytowe stosowane w jachtach są trudne do modyfikacji, a ich struktura utrudnia realizację procesu cięcia czy ich łączenia,
- ze specyfiki wytrzymałości mechanicznej – komponenty są projektowane z uwzględnieniem określonych wymagań wytrzymałościowych i warunków pracy, co ogranicza możliwości ich adaptacji do innych zastosowań; przykładowo maszt jachtowy może być wystarczający jako konstrukcja nośna, ale jego elastyczność może nie być pożądana w wielu innych obiektach,
- z niedopasowania do nowych warunków użytkowania – wielu komponentów nie można w prosty sposób przeznaczyć do pełnienia innej funkcji bez konieczności dodatkowej modyfikacji; przykładowo, elementy układów napędowych z jachtów mogą być wykorzystane w agregatach prądotwórczych, ale wymagają istotnych zmian, a szczególnie dostosowania systemów chłodzenia i sterowania,
- ze zmieniających się norm bezpieczeństwa i regulacji prawnych – wiele obiektów technicznych, szczególnie stosowanych w transporcie musi spełniać określone normy; wymagania normatywne często zmieniają się w czasie, co ma znaczenie w przypadku wieloletniej eksploatacji jachtu i ewentualnego późniejszego wykorzystania jego komponentów; zmiana funkcji jachtu lub jego komponentów wymusza natomiast zapewnienie zgodności z innymi uregulowaniami normatywnymi, co też ogranicza możliwości ich wykorzystania.

Odpowiedzią na różnorodne ograniczenia co do ponownego wykorzystania elementów jachtu w innym charakterze jest nadanie konstrukcji jachtu w możliwie największym wymiarze charakteru modułowego. Modułowość sprzyja bowiem realizacji koncepcji procesów demontażu, a w jego następstwie ponownemu wykorzystaniu do innych zastosowań. Konstrukcja współczesnych jachtów ma w coraz większym wymiarze charakter modułowy, pozwalając na łatwą wymianę i adaptację jej elementów do nowych funkcji. Temu też sprzyja rozwój technik obróbki materiałów, druku 3D oraz recyklingu selektywnego.

Podsumowując, nadawanie nowej funkcji istniejącym produktom lub ich komponentom (w następstwie ich naprawy), w pełni wpisuje się w założenia gospodarki

o obiegu zamkniętym. Opierając się na adaptacji i redefinicji funkcjonalnej obiektów, umożliwia ich dalsze użytkowanie w nowym przeznaczeniu, dopuszczając nawet ingerencję w strukturę materiałową. Tym samym realizuje cele gospodarki o obiegu zamkniętym umożliwiając ponowne wykorzystanie jachtów lub ich komponentów do pełnienia nowych funkcji zamiast kierowania ich do utylizacji lub przetworzenia na surowce wtórne.

J) Zdarność do recyklingu materiałów zastosowanych w konstrukcji

Zgodnie z definicją zawartą w Ustawie z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach, recykling to odzysk, w ramach którego odpady są ponownie przetwarzane na produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym celu lub innych celach. Obejmuje to również ponowne przetwarzanie materiału organicznego (tzw. recykling organiczny), ale nie obejmuje odzysku energii ani ponownego przetwarzania na materiały przeznaczone do wykorzystania jako paliwa lub do prac ziemnych [N.24].

Wraz z rosnącą liczbą wycofywanych z eksploatacji jednostek pływających oraz zaostrzającymi się regulacjami środowiskowymi, zasadne jest opracowanie efektywnych metod demontażu, segregacji materiałów oraz ponownego wykorzystania komponentów i materiałów stosowanych w jachtach. Sprzyjałoby to rozwojowi recyklingu jachtów, który może stanowić cenne źródło strategicznych pierwiastków i metali, które mogą być skutecznie odzyskiwane i ponownie wykorzystywane w przemyśle. Metale takie jak aluminium, stal nierdzewna, miedź, tytan oraz metale ziem rzadkich znajdują szerokie zastosowanie w konstrukcji jednostek pływających, a ich odzysk może zmniejszyć zależność od importu surowców mineralnych. W obliczu rosnących ograniczeń w handlu surowcami oraz geopolitycznych napięć, recykling wycofanych jednostek pływających staje się ważnym elementem strategii bezpieczeństwa surowcowego.

Recykling jachtów dobrze wpisuje się w ramy założeń koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Branża jachtowa generuje bowiem znaczące ilości odpadów, w tym np. trudno przetwarzalnych materiałów kompozytowych. Dobrze zaplanowany recykling mógłby w tej branży sprzyjać:

- zmniejszeniu zapotrzebowania na surowce pierwotne i co za tym idzie redukcji kosztów produkcji nowych jednostek,
- ograniczeniu niekorzystnych oddziaływań środowiskowych związanych z wydobyciem, przetwarzaniem i transportem surowców,
- zamykaniu obiegu materiałowego, a co za tym idzie lepszemu gospodarowaniu zasobami w przemyśle morskim.

Stosowanie recyklingu w branży jachtowej ma jednak wiele ograniczeń. Jednym z nich jest szerokie spektrum materiałów stosowanych w jachtach, a co za tym idzie – zróżnicowanie ich podatności recyklingowej. Metale, takie jak aluminium, stal nierdzewna i miedź, mają wysoką zdarność do recyklingu, ponieważ mogą być wielokrotnie przetapiane bez utraty właściwości. W przeciwieństwie do nich kompozyty polimerowe (GFRP, CFRP) ze względu na swoją złożoną strukturę stanowią duże wyzwanie recyklingowe, wymagając zaawansowanych metod, takich jak piroliza czy separacja chemiczna. Wyróżnia się kilka głównych rodzajów kompozytów:

- GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) – są to dominujące w produkcji jachtów laminaty poliestrowo-szklane, trudne do recyklingu, często składowane lub spalane,
- CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) – laminaty epoksydowo-węglowe stosowane w jachtach regatowych, kosztowne w produkcji i trudne w przetwarzaniu,
- kompozyty aramidowe (Kevlar, Twaron) – są one lekkie i wytrzymałe, ale bardzo trudne w realizacji procesu odzysku,
- termoplastyczne laminaty kompozytowe – jest to nowoczesna alternatywa dla tradycyjnych kompozytów; mogą one być poddawane recyklingowi mechanicznemu lub chemicznemu.

Materiały kompozytowe są szeroko stosowane w jachtach, głównie w konstrukcjach kadłubów i pokładów, ze względu na ich lekkość, trwałość oraz odporność na działanie wody morskiej. Tworzywa sztuczne stosowane w jachtach charakteryzują się różną podatnością na recykling. ABS, PVC, polietylen i polipropylen wykorzystywane w elementach wnętrza, zbiornikach czy instalacjach sanitarnych mogą być przetwarzane mechanicznie (rozdrabnianie na granulaty) lub chemicznie (depolimeryzacja do monomerów). Pianki poliuretanowe (PUR) i polistyrenowe (EPS) stosowane w izolacjach i konstrukcjach wypełniających kadłuby są trudne do recyklingu – ich odzysk wymaga energochłonnych procesów pirolizy lub depolimeryzacji, co ogranicza ich ponowne wykorzystanie.

Jak wynika z przedstawionego opisu, skład materiałowy elementów jachtów jest kluczowym czynnikiem wpływającym na ich podatność recyklingową. Niewielkim uproszczeniem byłoby stwierdzenie, że metale mają wysoką zdolność do odzysku, tworzywa sztuczne umiarkowaną, a największe wyzwanie technologiczne stanowią kompozyty.

Pewnym wyjściem naprzeciw potrzebom zapewnienia przyjazności środowiskowej konstrukcji jachtów w kontekście recyklingu mogłoby być stosowanie zasad DfR (design for recycling). Konsekwencją tego byłoby projektowanie jednostek w sposób ułatwiający odzysk surowców i ponowne wykorzystanie komponentów. Opierając się na analogii do innych kategorii obiektów technicznych można stwierdzić, że praktykowanie DfR prowadzi do [49]:

- stosowania na możliwie dużą skalę materiałów o wysokiej podatności na recykling,
- ograniczenia używania kompozytów,
- ograniczenia liczby użytych materiałów,
- eliminacji wielomateriałowych połączeń nierozłącznych (np. połączeń klejonych),
- zapewnienia wysokiego stopnia modułowości konstrukcji,
- wdrożenia systemu oznakowania materiałów, który usprawnia ich identyfikację i późniejszą segregację.

K) Zdarność do utylizacji termicznej materiałów zastosowanych w jachcie

Spalanie jako proces termicznej utylizacji materiałów może być wykorzystywane zarówno do redukcji objętości odpadów, jak i do odzysku energii. Może ono obejmować termiczne przekształcanie odpadów w ciepło, energię elektryczną lub paliwa wtórne, co pozwala na ich częściowe wykorzystanie w innej formie. Spalanie jako odzysk energii, odnosić się powinno wyłącznie do tych materiałów, które nie mogą zostać ponownie użyte (reuse), naprawione (repair), poddane remanufacturingowi lub recyklingowi. Innymi słowy z perspektywy gospodarki o obiegu zamkniętym spalanie stanowi swego rodzaju „ostateczność” i powinno dotyczyć tylko tych materiałów, do których nie mogą być stosowane inne formy końcowego zagospodarowania, w tym szczególnie recykling mechaniczny lub chemiczny. Stosowanie spalania powinno być ograniczone do absolutnego minimum i dopuszczać się je powinno wyłącznie w przypadku braku alternatywnych rozwiązań.

Tak też sugeruje się je stosować w odniesieniu do obiektów branży jachtowej, które cechują się dużą różnorodnością materiałów stosowanych na jednostkach pływających. W przypadku odpadów jachtowych, potencjał energetyczny jest szczególnie istotny dla materiałów nierocyklingowalnych, takich jak kompozyty polimerowe, pianki poliuretanowe, tworzywa sztuczne i odpady drewniane. Ich odpowiednie zagospodarowanie w procesach spalania z odzyskiem energii, pirolizy lub zgazowania może stanowić alternatywne źródło energii, choć jak wspomniano, z perspektywy gospodarki o obiegu zamkniętym proces ten powinien być traktowany jako ostateczność. Dla procesu spalania i jego efektywności istotne są takie czynniki, jak np.:

- skład chemiczny – materiały zawierające duże ilości węgla i wodoru (np. tworzywa sztuczne, pianki PUR) mają wyższą wartość opałową niż materiały nieorganiczne,
- wilgotność – wysoka zawartość wody obniża efektywność spalania, dlatego odpady muszą być odpowiednio suszone przed procesem termicznym,
- obecność domieszek niepalnych – dodatki mineralne, włókna szklane lub metalowe zmniejszają wartość energetyczną odpadu i powodują powstawanie większej ilości popiołów,
- zanieczyszczenia chemiczne – niektóre odpady (np. PVC) podczas spalania emitują toksyczne substancje (chlorowodór, dioksyne), co wymaga zastosowania kosztownych systemów oczyszczania gazów spalinowych.

Kluczowym parametrem dla efektywności procesu spalania, który znajduje przełożenie na ilość energii, jaką można pozyskać z termicznego przekształcenia odpadów, jest potencjał energetyczny odpadu. Jego wartość wyrażana jest w megadżulach na kilogram (MJ/kg) i zależy od składu chemicznego oraz wartości opałowej materiału. Propozycję sposobu wyznaczania wartości wskaźnika zdarności do spalania materiałów użytych w jachcie przedstawiono w rozdziale 4.3 niniejszej pracy.

4.2. Wskaźniki modelu oceny cyrkularności

4.2.1. Ramy modelu

W oparciu o założenia sformułowane w rozdziale 4.1 rozprawy podjęto próbę zdefiniowania zależności, które kształtują poszczególne elementy modelu oceny cyrkularności jachtu. Zostały one scharakteryzowane w dalszym ciągu niniejszego rozdziału. Zgodnie z treścią rozdziału 4.1 kolejno zdefiniowano wskaźniki:

- intensywności użytkowania jachtu,
- zastosowania materiałów pierwotnych w budowie jachtu,
- uciążliwości środowiskowej materiałów zastosowanych w jachcie,
- minimalizacji masy jachtu,
- zastosowania komponentów recykulowanych w jachcie,
- potencjału do ponownego użycia komponentów jachtu,
- naprawialności jachtu,
- potencjału do regeneracji (remanufacturingu) jachtu,
- potencjału do pełnienia innych funkcji (niż pierwotnie nadane) po przywróceniu sprawności użytkowej,
- zdolności do recyklingu,
- zdolności do utylizacji termicznej.

Definiując zależności dotyczące modelu oceny cyrkularności przyjęto, że wszystkie wskaźniki powinny być bezwymiarowe oraz, że będą wśród nich zarówno minimenty (te, dla których niższa wartość wskaźnika jest korzystniejsza) jak i maksymenty (im wyższa wartość wskaźnika, tym jest to korzystniejsze). Założono jednocześnie, że ich wartości powinny być zawarte w przedziale $<0, 1>$, aby ułatwić interpretację wyników analiz prowadzonych z wykorzystaniem modelu.

4.2.2. Wskaźnik intensywności użytkowania jachtu

To, na ile intensywnie użytkowany jest jacht, proponuje się wyznaczać w oparciu o informacje o czasie jego użytkowania w odniesieniu do okresu, w którym intensywność użytkowania jest analizowana. Przedstawia to następująca zależność:

$$W_T = \frac{t}{T} \quad (4.1)$$

gdzie:

W_T – wskaźnik intensywności użytkowania jachtu,

t – czas, w którym jacht jest użytkowany,

T – okres, w którym dokonywany jest pomiar intensywności użytkowania jachtu.

Wyznaczenia wielkości wskaźnika proponuje się dokonywać w oparciu o przynajmniej roczny okres pomiaru, co pozwoli na uwzględnienie zmian w użytkowaniu jachtu będących konsekwencją naturalnej sezonowości. Dane zebrane z takiego okresu

mogą być wiarygodną podstawą do podejmowania decyzji dotyczących zarządzania procesem użytkowania jachtu. W przypadku podejmowania decyzji o charakterze strategicznym dobrze jest za podstawę przyjmować dane z dłuższego niż roczny okresu pomiaru. Korzystniej byłoby też posługiwać się danymi z użytkowania porównywalnych jednostek pływających, obejmując okresem pomiaru nawet cały okres ich użytkowania. Pozwala to uwzględnić rzeczywisty obraz eksploatacji, w tym zmienne warunki techniczne (oraz ich konsekwencje w postaci np. remontów), infrastrukturalne oraz klimatyczne.

4.2.3. Wskaźnik zastosowania materiałów pierwotnych w budowie jachtu

Redukcja udziału materiałów pierwotnych jest jednym z czynników istotnych dla zapewnienia cyrkularności jachtów i zmniejszenia ich wpływu na środowisko. Im większy udział materiałów pierwotnych, tym większe jest sumaryczne obciążenie środowiskowe generowane w cyklu życia obiektu technicznego. Powinno się dążyć do tego, aby udział materiałów pierwotnych zastosowanych w jachcie był jak najmniejszy, co przekłada się na lepsze wykorzystanie surowców wtórnych.

Wskaźnik wykorzystania materiałów pierwotnych dla jachtu proponuje się wyznaczać w oparciu o iloraz masy materiałów pierwotnych i masy całkowitej jachtu. Odzwierciedla to następująca zależność:

$$W_{RM} = \frac{\sum_{i=1}^p m_{pi}}{m_c} \quad (4.2)$$

gdzie:

W_{RM} – wskaźnik wykorzystania materiałów pierwotnych,

m_{pi} – masa materiału pierwotnego i ,

p – liczba analizowanych materiałów pierwotnych zastosowanych w jachcie (lub w komponentach, które uwzględniono w analizie),

m_c – masa całkowita jachtu (lub masa tych komponentów, które objęte są zakresem analizy).

Wskaźnik W_{RM} jest minimentem. Ze względu na duże zróżnicowanie konstrukcji jachtowych, szczególnie w zakresie ich wyposażenia uznano, że nie jest konieczne, aby w każdym przypadku analizować wszystkie elementy jachtu, a w konsekwencji odnosić ich masy do masy całkowitej jachtu. Na potrzeby stosowania modelu oceny cyrkularności jachtu przygotowano typologię komponentów jachtu i każdemu z typów przypisano składowe (komponenty), które mogą być zastosowane na jachcie. Składowe przypisane do poszczególnych typów w sposób usystematyzowany przedstawiono w rozdziale 4.4.1 niniejszej rozprawy. W ramach dokonanego podziału wyszczególniono następujące rodzaje komponentów:

- konstrukcyjne,
- napędowe i sterowe,
- instalacyjne i systemowe,

- wyposażenie wnętrza i użytkowe,
- systemy uzupełniające.

Posługując się zaproponowaną typologią, wskaźnik wykorzystania materiałów pierwotnych można wyznaczać zatem jedynie dla wybranego komponentu lub grupy podzespołów.

4.2.4. Wskaźnik uciążliwości środowiskowej materiałów zastosowanych w budowie jachtu

Jak wspomniano w rozdziale 4.1, sposób wyznaczania wskaźnika uciążliwości środowiskowej materiałów na potrzeby modelu oceny cyrkularności oparto na podstawach metodycznych opracowanych przez Wimmera. W publikacji [100], zaproponował on przypisanie materiałów do 8 klas odzwierciedlających poziom wpływu na środowisko oraz możliwość zastosowania materiału w procesach projektowania ekologicznego.

Z perspektywy wykorzystania klasyfikacji materiałów w kształtowaniu obiektów technicznych branży jachtowej uznano jednak, że klasyfikacja Wimmera nie dostarcza wystarczających danych. Wymaga ona modernizacji i rozszerzenia o materiały, które są współcześnie wykorzystywane w branży jachtowej. W związku z tym przeprowadzono szereg prac obliczeniowych (z wykorzystaniem metody LCA), aby doprowadzić do powstania klasyfikacji, która uwzględnia również materiały wykorzystywane współcześnie w branży jachtowej. Wyniki obliczeń obciążeń środowiskowych generowanych przez użycie wszystkich materiałów zaproponowanych w klasyfikacji doprowadziły do zaproponowania ich podziału na 10 klas. Bardziej szczegółowo zagadnienie opracowania klasyfikacji materiałowej opisano w rozdziale 4.4.2 niniejszej rozprawy.

W ramach rozważań nad tym, jak wyznaczyć wskaźnik uciążliwości środowiskowej jachtu zaproponowano, aby we wzorze wykorzystać numer klasy materiału wg opracowanej klasyfikacji materiałowej. Analogicznie do klasyfikacji Wimmera, wyższy numer grupy materiałowej w klasyfikacji oznacza, że materiały generują większe niekorzystne oddziaływania środowiskowe. Wskaźnik przyjął następującą postać:

$$W_E = \frac{\sum_{i=1}^r k_i m_i}{10 m_c} \quad (4.3)$$

gdzie:

W_E – wskaźnik uciążliwości środowiskowej jachtu,

k_i – numer klasy materiału i wg opracowanej klasyfikacji,

m_i – masa materiału i ,

m_c – masa całkowita jachtu,

r – liczba analizowanych rodzajów materiałów.

Wskaźnik W_E jest minimumem. Przedstawiona propozycja sposobu jego wyznaczania uwzględnia masę materiałów użytych w budowie jachtu oraz ich poziom uciążliwości środowiskowej wskazanej w oparciu o przypisanie do określonej klasy. Podobnie, jak w przypadku wskaźnika zastosowania materiałów pierwotnych, tu również nie jest konieczne, aby w każdym przypadku analizować całą konstrukcję jachtu. Wskaźnik umożliwia analizę wybranych podzespołów konstrukcji jachtu, a w ich wyborze pomocna może być zaproponowana w rozprawie typologia komponentów jachtu (w rozdziale 4.4.1 rozprawy), gdzie określono składowe (komponenty), które mogą być zastosowane na jachcie.

4.2.5. Wskaźnik minimalizacji masy jachtu

Możliwości minimalizacji masy jachtu mogą być rozpatrywane podczas prac nad kształtowaniem założeń projektowych dotyczących nowej jednostki pływającej oraz podczas uzgadniania zakresu i sposobu realizacji modernizacji istniejących jachtów. Mogą one dotyczyć wyboru materiałów na kluczowe komponenty konstrukcyjne (np. kadłub), wyboru lub zmiany elementów wyposażenia jachtu, ale mogą też być ukierunkowane na analizę możliwości rezygnacji z niektórych elementów, co wiąże się z ograniczeniem funkcjonalności jachtu. Z tego powodu trzeba patrzeć na jacht przez pryzmat zbioru jego komponentów. Jednocześnie należy pamiętać, że ze względu na związki pomiędzy różnymi parametrami technicznymi jachtu za cel główny w pracach projektowych nad nowym (lub zmodernizowanym) jachtem nie można uznać minimalizacji jego masy (zgodnie z informacjami zawartymi w rozdz. 4.1). Z perspektywy założeń gospodarki o obiegu zamkniętym minimalizacja masy jest jednak w pełni uzasadniona i może być priorytetem pod warunkiem zachowania cech funkcjonalnych jachtu. Stąd też minimalizację masy w niniejszej rozprawie potraktowano jako maksimum, a w nazewnictwie składowych zaproponowanej zależności matematycznej (wzór poniżej) użyto sformułowań „masa początkowa” i „masa po redukcji”.

$$W_m = \frac{\sum_{i=1}^k (m_{pki} - m_{rki})}{m_p} \quad (4.4)$$

gdzie:

W_m – wskaźnik redukcji masy jachtu,

m_{pki} – masa początkowa komponentu i (przed redukcją),

m_{rki} – masa komponentu i po redukcji,

k – liczba analizowanych komponentów,

m_p – masa początkowa jachtu (lub zbioru analizowanych k komponentów w przypadku wykorzystania wskaźnika w analizie o ograniczonym zakresie).

W celu wyznaczenia wskaźnika minimalizacji masy jachtu proponuje się dokonanie sumowania wartości redukcji masy dla wszystkich komponentów podlegających pracom

nad zaprojektowaniem nowego jachtu lub jego modernizacją. Otrzymaną wartość proponuje się odnieść do masy całkowitej jachtu przed rozpoczęciem prac.

4.2.6. Wskaźnik zastosowania komponentów recykulowanych w jachcie

Stosowanie używanych komponentów (pochodzących z recyklingu) w budowie i modernizacji jachtów może znacząco ograniczyć niekorzystne oddziaływania środowiskowe jachtu przez redukcję zapotrzebowania na nowe materiały, ograniczenie emisji związanych z produkcją oraz minimalizację odpadów powstających w cyklu życia jednostek pływających. Rezultatem korzystania z używanych komponentów jest wzrost poziomu cyrkularności jachtu. Dodatkowo, z punktu widzenia ekonomicznego, stosowanie używanych komponentów jest opłacalne. Regeneracja i ponowne wykorzystanie istotnych elementów konstrukcyjnych, napędowych czy systemowych może znacząco obniżyć koszty produkcji i eksploatacji, a jednocześnie może pozwolić na zachowanie wysokich standardów technicznych.

Sposób obliczania wskaźnika zastosowania komponentów recykulowanych jachtu proponuje się oprzeć na analizie konstrukcji całego jachtu, którą można przeprowadzić stosując zaproponowaną w rozprawie typologię komponentów jachtu (rozdział 4.4.1 rozprawy). Możliwe jest również ograniczenie zakresu danych uwzględnianych we wskaźniku na skutek ograniczenia zakresu całej analizy, np. w sytuacji, w której analizowana jest przykładowo jedynie część kadłubowa jachtu.

Punktem wyjścia w zaproponowanej metodzie jest identyfikacja komponentów, które były już wykorzystywane w innej jednostce pływającej i mogą zostać (lub zostały) zainstalowane w jachcie będącym przedmiotem oceny cyrkularności. Sumaryczna masa tych komponentów podzielona przez masę całkowitą jednostki (ewentualnie masę analizowanego zespołu, np. części kadłubowej) określa wielkość wskaźnika zastosowania komponentów recykulowanych jachtu.

$$W_U = \frac{\sum_{i=1}^k m_{ki}}{m_c} \quad (4.5)$$

gdzie:

W_U – wskaźnik zastosowania komponentów recykulowanych,

m_{ki} – masa komponentu i , który pochodzi lub może pochodzić z innego używanego jachtu,

k – liczba analizowanych komponentów,

m_c – masa całkowita jachtu (lub masa zespołu, dla którego wskaźnik jest analizowany).

Dla wartości wskaźnika nie ma znaczenia, czy komponenty recykulowane pochodzą z jednej czy z różnych jednostek pływających. Ważne jest natomiast, aby pamiętać, że wskaźnik jest maksymentem.

4.2.7. Wskaźnik potencjału do ponownego użycia komponentów jachtu

Korzyści środowiskowe i ekonomiczne wynikające z zapewnienia możliwości stosowania w jachtach komponentów nadających się do ponownego użycia w innych jednostkach pływających są analogiczne do tych, na które wskazano przy okazji omawiania poprzedniego wskaźnika (wskaźnika wykorzystania komponentów recykulowanych w jachcie). Należy jednak pamiętać, że w przypadku wskaźnika potencjału do ponownego użycia komponentów bierze się pod uwagę te komponenty, które nie wymagają naprawy, regeneracji czy jakiegokolwiek przetworzenia.

Wyznaczając wskaźnik potencjału do ponownego wykorzystania komponentów jachtu należy rozpatrywać przepływ komponentów między dwoma jednostkami tj.:

- jednostką źródłową, poddawaną analizie pod kątem cyrkularności, z której pozyskiwane są komponenty przeznaczone do ponownego użycia,
- jednostką docelową, w której komponenty z jednostki źródłowej mogą zostać zamontowane.

Rozpatrywany wskaźnik jest ilorazem masy komponentów, które mogą potencjalnie być wykorzystane w innych jednostkach po zakończeniu eksploatacji jachtu i masy całkowitej jednostki (ewentualnie masy analizowanego zespołu, np. części kadłubowej), którego potencjał do ponownego użycia w innym jachcie się rozpatruje.

$$W_{Reu} = \frac{\sum_{i=1}^k m_{ki}}{m_c} \quad (4.6)$$

gdzie:

W_{Reu} – wskaźnik potencjału do ponownego użycia komponentów jachtu,

m_{ki} – masa komponentu i , który ma potencjał do ponownego użycia w innym jachcie,

k – liczba analizowanych komponentów,

m_c – masa całkowita jachtu (lub masa zespołu, dla którego wskaźnik jest analizowany).

Z perspektywy wyznaczania wielkości wskaźnika nie ma znaczenia, czy komponenty jednostki źródłowej zostaną wykorzystane w jednej czy w kilku jednostkach pływających. Istotna jest tylko masa komponentów nadających się do ponownego wykorzystania bez podejmowania procesu naprawy, regeneracji czy jakiegokolwiek przetworzenia. Wskaźnik potencjału do ponownego wykorzystania komponentów jachtu jest również maksimumem.

4.2.8. Wskaźnik naprawialności jachtu

Pojęcia przyjęte na potrzeby modelu oceny cyrkularności jachtu dotyczące jego naprawialności wyjaśniono w rozdziale 4.1 niniejszej rozprawy. W oparciu o nie dokonano próby zdefiniowania wskaźnika naprawialności jachtu. Założono, że wskaźnik powinien uwzględniać kwestie związane z:

- trwałością jachtu (możliwość naprawy komponentów przyczynia się do zwiększenia trwałości jachtu rozumianej jako czas zachowania funkcjonalności i

sprawności operacyjnej mimo występowania awarii, które w procesie naprawy mogą zostać usunięte),

- masą jachtu i jego komponentów (istotne jest, aby udział masowy komponentów, które mogą podlegać naprawie był jak największy w masie całkowitej jachtu).

Wskaźnik naprawialności proponuje się wyznaczać z zależności, w której uwzględnia się zarówno udział masowy komponentów zdolnych do naprawy oraz ilościowy wpływ naprawy na trwałość poszczególnych komponentów, a co za tym idzie – całego jachtu.

$$W_{Rep} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{m_{ki}}{m_c} \times \left(1 - \frac{T_{Pi}}{T_{Pi} + T_{Repi}} \right) \right) \quad (4.7)$$

gdzie:

W_{Rep} – wskaźnik naprawialności jachtu,

m_{ki} – masa komponentu i , który może podlegać naprawom,

k – liczba analizowanych komponentów,

m_c – masa całkowita jachtu (lub masa zespołu, dla którego wskaźnik jest analizowany),

T_{Pi} – prognozowana trwałość komponentu i (założona przez projektanta),

T_{Repi} – okres, o który wydłużono trwałość komponentu i dzięki realizacji napraw.

Zaproponowany wskaźnik naprawialności nie służy do oceny potencjału jachtu do realizacji jego napraw. Ma on wskazywać na poziom spełnienia postulatów gospodarki o obiegu zamkniętym w zakresie naprawialności obiektów. Stąd też jako maksyment przyjmuje on tym korzystniejsze wartości, im masa komponentów zdolnych do naprawy jest większa oraz gdy rośnie czas, o który dzięki naprawom wydłuża się cykl eksploatacji jachtu. Trzeba tym samym zaznaczyć, że wskaźnik naprawialności w zaproponowanej postaci nie wskazuje w sposób bezpośredni wpływu potencjału komponentów do realizacji napraw na trwałość jachtu. Wynika to ze złożoności zagadnień związanych z powstawaniem uszkodzeń i procesami ich naprawy, a szczególnie z przesłanek wskazujących na to, że:

- jacht składa się z wielu różnych komponentów, które mają odmienny prognozowany czas eksploatacji i różne scenariusze awarii,
- nie można jednoznacznie określić, kiedy i ile razy dany komponent zostanie naprawiony oraz jak te naprawy wpłyną na całkowity czas eksploatacji jachtu,
- trwałość jednostki jako całości nie jest prostą sumą trwałości komponentów, lecz wyznacza ją najmniej trwały komponent,
- możliwość naprawy niektórych komponentów może pozwolić na kontynuację eksploatacji, ale nie przesądza o całkowitej trwałości jachtu.

W realnych warunkach o podjęciu procesu naprawy decydują nie tylko aspekty środowiskowe (w tym przypadku związane z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym), ale przede wszystkim aspekty ekonomiczne i utylitarne. Korzystne jest natomiast to, że ocena opłacalności naprawy dokonywana jest często przez pryzmat tego,

o ile wydłuży się okres eksploatacji jachtu pod warunkiem zachowania kluczowych parametrów technicznych, bezpieczeństwa oraz funkcjonalności jachtu.

4.2.9. Wskaźnik potencjału do realizacji regeneracji (remanufacturingu) jachtu

Jak wspomniano w rozdziale 4.1, sposób wyznaczania wskaźnika potencjału do realizacji procesów regeneracji (inaczej nazywanej też remanufacturingiem lub odbudową) oparto na założeniu uwzględnienia w nim dwóch aspektów:

- udziału masy tych komponentów jachtu, które są zdadne do realizacji procesów odbudowy w masie całkowitej jachtu,
- okresu trwałości komponentu jachtu, o który wydłużona zostaje trwałość początkowa (przyjęta przez projektantów).

Te dwa zagadnienia powiązane ze sobą odpowiadają założeniom koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym i powinny być uwzględnione w modelu oceny cyrkularności jachtu. Remanufacturing jachtu umożliwia bowiem wydłużenie cyklu życia jednostki pływającej przez umożliwienie jego powtórnego wykorzystania (po zakończeniu pierwotnej eksploatacji) do tych samych celów i z zachowaniem pełnego spektrum funkcjonalności. Innymi słowy remanufacturing umożliwia zwielokrotnienie cyklu życia jachtu lub przynajmniej jego komponentów.

Jak wspomniano, wskaźnik potencjału do realizacji procesów odbudowy proponuje się wyznaczać z zależności, w której uwzględnia się zarówno udział masowy komponentów zdalnych do remanufacturingu w całkowitej masie jachtu oraz ilościowy wpływ naprawy na trwałość jachtu (w tym poszczególnych komponentów). Zależność tę opisuje poniższy wzór:

$$W_{Rem} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{m_{ki}}{m_c} \times \left(1 - \frac{T_{Pi}}{T_{Pi} + T_{Remi}} \right) \right) \quad (4.8)$$

gdzie:

W_{Rem} – wskaźnik potencjału do realizacji remanufacturingu,

m_{ki} – masa komponentu i , który może podlegać remanufacturingowi,

k – liczba analizowanych komponentów,

m_c – masa całkowita jachtu (lub masa zespołu, dla którego wskaźnik jest analizowany),

T_{Pi} – trwałość początkowa komponentu i (trwałość prognozowana przez projektanta),

T_{Remi} – okres, o który wydłużono trwałość komponentu i dzięki realizacji remanufacturingu.

Zaproponowany wskaźnik potencjału do regeneracji (remanufacturingu) służy do oceny efektów procesu odbudowy jachtu, w tym jego komponentów, przez pryzmat spełnienia postulatów gospodarki o obiegu zamkniętym. Stąd też jako maksyment przyjmuje on tym korzystniejsze wartości, im masa komponentów zdalnych do realizacji procesów odbudowy zwiększa się oraz gdy rośnie czas, o który dzięki odbudowie wydłuża się całkowity czas eksploatacji jachtu. Wskaźnik ten jest zatem narzędziem

pozwalającym ocenić efektywność remanufacturingu w kontekście poprawy trwałości jednostki pływającej.

W procesie oceny jednostki pływającej z zastosowaniem wskaźnika potencjału do remanufacturingu możliwe jest pośrednio zidentyfikowanie tych komponentów, których odbudowa ma największy wpływ na zwiększenie trwałości jednostki. Jeśli bowiem przykładowo komponent ma dużą masę, a jego odbudowa znacząco zwiększa jego trwałość, to jest to sytuacja najkorzystniejsza z perspektywy założeń koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Niska masa komponentu jachtu lub niewielki wzrost okresu jego trwałości (po procesie remanufacturingu) pogarszają pozytywny obraz efektywności procesu odbudowy komponentu, a co za tym idzie (biorąc pod uwagę szeroki zbiór komponentów) – całego jachtu.

4.2.10. Wskaźnik potencjału do pełnienia innych funkcji (niż pierwotnie nadane) po przywróceniu sprawności użytkowej

Nadanie nowej funkcji istniejącym obiektom technicznym (zwane „repurpose”) stanowi istotny kierunek koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Jak wyjaśniono w rozdziale 4.1 niniejszej rozprawy, opiera się ono na adaptacji (powiązanej z procesem naprawy) i redefinicji funkcjonalnej obiektów, umożliwiając ich dalsze użytkowanie w nowym kontekście przy minimalnej ingerencji w strukturę konstrukcji. Repurpose sprzyja zatem ograniczeniu ilości odpadów przez wydłużenie cyklu życia obiektu, a jednocześnie ogranicza zapotrzebowanie na nowe surowce i materiały potencjalnie niezbędne do wytwarzania obiektów pełniących inne funkcje.

Sposób wyznaczania wskaźnika potencjału do przywrócenia sprawności użytkowej w celu wykorzystania jachtu lub jego komponentów do pełnienia innych funkcji niż pierwotnie nadane przez konstruktorów oparto na założeniu uwzględnienia dwóch aspektów:

- udziału masy komponentów jachtu, które mają potencjał do nadania im nowej funkcji (po przywróceniu im sprawności użytkowej) w masie całkowitej jachtu,
- całkowitej trwałości komponentu jachtu rozumianej jako suma trwałości w pierwotnym przeznaczeniu (przyjętej przez projektantów jachtu lub komponentu) i trwałości w okresie, kiedy jacht lub komponent pełnią nową funkcję.

Wydaje się, że takie ujęcie zagadnienia potencjału do przywrócenia sprawności użytkowej w powiązaniu z nadaniem nowej funkcji komponentowi jachtu koresponduje z założeniami koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Umożliwia ono bowiem wydłużenie cyklu życia komponentów jednostki pływającej (lub w szczególnych przypadkach całej jednostki) przez umożliwienie ich powtórnego wykorzystania (po przywróceniu sprawności użytkowej) do realizacji innych celów. Innymi słowy repurpose w kontekście branży jachtowej sprzyja wydłużeniu cyklu życia jachtu lub przynajmniej jego komponentów. Przykładem może być tu wykorzystanie wyeksploatowanego turystycznego katamaranu morskiego do pełnienia funkcji mieszkalnej (jako houseboat).

Potencjał do przywrócenia sprawności użytkowej i wykorzystania obiektu (jachtu lub jego komponentu) do innych funkcji niż pierwotnie nadane proponuje się wyznaczać z zależności, którą opisano poniższym wzorem:

$$W_{Pur} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{m_{ki}}{m_c} \times \left(1 - \frac{T_{Pi}}{T_{Pi} + T_{Puri}} \right) \right) \quad (4.9)$$

gdzie:

W_{Pur} – wskaźnik potencjału do realizacji koncepcji repurpose (powiązanej z przywróceniem sprawności użytkowej),

m_{ki} – masa komponentu i, który ma podlegać procesowi repurpose,

k – liczba analizowanych komponentów,

m_c – masa całkowita jachtu (lub masa zespołu, dla którego wskaźnik jest analizowany),

T_{Pi} – trwałość komponentu i określona dla pierwotnego przeznaczenia (trwałość prognozowana przez projektanta),

T_{Puri} – trwałość komponentu i prognozowana dla nowego przeznaczenia.

Zaproponowany wskaźnik potencjału do przywrócenia sprawności użytkowej i wykorzystania obiektu (jachtu lub jego komponentu) do innych funkcji pozwala na ocenę efektów praktycznego zastosowania koncepcji repurpose w kontekście założeń gospodarki o obiegu zamkniętym. Wskaźnik ten jest maksymentem i przyjmuje tym korzystniejsze wartości, im masa komponentów zdalnych do przywrócenia sprawności i nadania im nowej funkcji jest większa (w zestawieniu z masą całego jachtu). Korzystne wartości wskaźnik przyjmuje też wtedy, kiedy możliwie najbardziej wydłuża się czas eksploatacji jachtu lub jego komponentów w nowych zastosowaniach.

4.2.11. Wskaźnik zdolności do recyklingu

Aby ocenić podatność recyklingową materiałów i/lub komponentów stosowanych w jachtach w sposób usystematyzowany i porównywalny opracowano klasyfikację wzorowaną na klasyfikacji uciążliwości środowiskowej materiałów autorstwa Wimmera. Materiały i komponenty stosowane w budowie jachtów podzielono na 5 klas. Są to odpowiednio:

- klasa I – materiały/komponenty nierecyklingowalne,
- klasa II – materiały/komponenty o niskiej zdolności do recyklingu,
- klasa III – materiały/komponenty umiarkowanie recyklingowalne,
- klasa IV – materiały/komponenty o wysokiej zdolności do recyklingu,
- klasa V – materiały/komponenty w pełni recyklingowalne.

Podstawą przypisania materiału lub komponentu wykorzystywanego w budowie jachtów do określonej klasy było wyznaczenie dla niego poziomu podatności do recyklingu. Zagadnienie to w sposób szczegółowy wyjaśniono w rozdziale 4.4 niniejszej rozprawy.

W ramach rozważań nad tym, jak wyznaczyć wskaźnik zdolności do recyklingu jachtu zaproponowano, aby we wzorze wykorzystać numer klasy podatności recyklingowej, pamiętając, że niższy numer klasy w klasyfikacji oznacza, że materiały/komponenty są trudniejsze do obróbki w recyklingu. W konsekwencji tak przyjętego założenia wskaźnik zdolności do recyklingu przyjął następującą postać:

$$W_{Rec} = \frac{\sum_{i=1}^r k_i m_i}{5 m_c} \quad (4.10)$$

gdzie:

W_{Rec} – wskaźnik zdolności do recyklingu,

k_i – numer klasy materiału/komponentu i wg opracowanej klasyfikacji podatności recyklingowej,

m_i – masa materiału/komponentu i ,

m_c – masa całkowita jachtu,

r – liczba analizowanych rodzajów materiałów/komponentów.

Wskaźnik W_{Rec} jest maksymentem. Podobnie jak w wielu innych wskaźnikach zaproponowanych w rozprawie tu również nie jest konieczne, aby w każdym przypadku analizować całą konstrukcję jachtu. Wskaźnik umożliwia analizę wybranych elementów konstrukcji jachtu ze względu na kryterium zdolności do recyklingu. Można z jego wykorzystaniem określić zdolność do recyklingu tylko wybranego komponentu, np. części kadłubowej jachtu. Pomoc w tym może również zaproponowana w rozprawie typologia komponentów jachtu (rozdz. 4.4.1 rozprawy), gdzie określono składowe (komponenty), które mogą być zastosowane w jachcie.

4.2.12. Wskaźnik zdolności do utylizacji termicznej

Aby ocenić zdolność do utylizacji termicznej materiałów stosowanych w jachtach w sposób usystematyzowany, opracowano klasyfikację, którą przedstawiono w rozdziale 4.4.4 niniejszej rozprawy. Materiały stosowane w budowie jachtów zostały ocenione na podstawie ich wartości opałowej, a następnie przypisywane do jednej z 5 klas odpowiadających różnym poziomom zdolności do procesu spalania. W ten sposób materiały pogrupowano w ramach następujących klas:

- klasa I – materiały nie wykazujące potencjału energetycznego,
- klasa II – materiały o niskim potencjale energetycznym,
- klasa III – materiały o umiarkowanym potencjale energetycznym,
- klasa IV – materiały o wysokim potencjale energetycznym,
- klasa V – materiały o bardzo wysokim potencjale energetycznym.

W ramach rozważań nad zależnościami matematycznymi, które powinny odzwierciedlać istotę wskaźnika zdolności do utylizacji termicznej materiałów użytych w jachcie postanowiono oprzeć się na numerze klasy wskazującym na przystosowanie do zagospodarowania w procesie spalania. Zgodnie z przedstawionymi powyżej informacjami na temat poszczególnych klas należy pamiętać, że wyższy numer klasy materiałowej oznacza, że materiał ma wyższy potencjał energetyczny, a tym samym bardziej nadaje się do zagospodarowania w procesie spalania. Przyjęte założenia pozwoliły na sformułowanie następującej zależności opisującej wskaźnik zdolności do utylizacji termicznej:

$$W_{Inc} = \frac{\sum_{i=1}^r k_i m_i}{5 m_c} \quad (4.11)$$

gdzie:

W_{Inc} – wskaźnik zdolności do utylizacji termicznej,

k_i – numer klasy materiału i wg opracowanej klasyfikacji zdolności do utylizacji termicznej,

m_i – masa materiału i ,

m_c – masa całkowita jachtu,

r – liczba analizowanych rodzajów materiałów.

Wskaźnik W_{Inc} jest maksimumem, co oznacza, że korzystne jest, aby przyjmował wartości maksymalne. Zaproponowana postać wskaźnika umożliwia analizę nie tylko całego jachtu, ale też poszczególnych komponentów. Gdy analizowany jest pojedynczy komponent (ze względu na kryterium zdolności do utylizacji termicznej), w miejscu masy całkowitej jachtu powinna się pojawić masa całkowita komponentu.

4.3. Główne składowe modelu oceny cyrkularności

W oparciu o opracowane wskaźniki, scharakteryzowane w szczegółowy sposób w rozdziale 4.2 rozprawy, dokonano próby zbudowania modelu oceny cyrkularności, który będzie wskazywać w przejrzysty sposób na ile jacht jest zbliżony z założeniami koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Innymi słowy przyjęto, że informacja będąca rezultatem zastosowania proponowanego modelu oceny będzie odzwierciedlać całkowity poziom cyrkularności ocenianej jednostki pływającej.

Aby zapewnić rzetelność, trafność i użyteczność budowanego modelu oceny cyrkularności, podczas kształtowania zbioru wskaźników pamiętano o cechach, jakie ten zbiór powinien spełniać. Za istotne cechy proponowanego zbioru przyjęto przede wszystkim:

- kompletność – kryteria powinny obejmować wszystkie istotne aspekty oceny cyrkularności obiektu technicznego,
- rozłączność – kryteria powinny być wzajemnie niezależne,
- mierzalność – kryteria powinny być oceniane w sposób możliwie ilościowy, a nie jakościowy,
- zrozumiałość – kryteria powinny być jasne i jednoznaczne ze względu na konieczność ograniczenia ryzyka różnych interpretacji,
- istotność – każde kryterium powinno mieć istotny związek z wybranymi aspektami cyrkularności obiektu,
- skalowalność – kryteria powinny być możliwe do zastosowania zarówno w odniesieniu do prostych, jak i złożonych obiektów technicznych (np. w odniesieniu do komponentu jachtu, jak i całego jachtu).

W związku z oczekiwaniami dotyczącymi cech, jakie powinien spełniać zbiór kryteriów wykorzystanych w modelu oceny cyrkularności, wskaźniki wybrane do zastosowania w modelu zostały zweryfikowane przez pryzmat prezentowanych w

literaturze przedmiotu strategii stosowania koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Należy jednak zaznaczyć, że nie chodziło o zweryfikowanie, czy każda znana strategia GOZ znajduje odzwierciedlenie w przyjętych kryteriach oceny. Strategii jest zbyt wiele i często dotyczą one łączących się ze sobą aspektów stosowania GOZ. Strategie znane z literatury [39] posłużyły jako punkt odniesienia do zweryfikowania tego, czy proponowany zbiór kryteriów w opracowanym modelu oceny jest kompletny oraz czy w trafny i zrozumiały sposób odzwierciedla istotne aspekty koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym.

Wskaźniki stanowiące główne składowe modelu oceny cyrkularności jachtu przedstawiono w tabeli 4.2. Wskaźniki te są kryteriami modelu i przyjmują dwie postacie. Występują wskaźniki będące maksymentami i takie, które są minimementami. Konieczne stało się zatem zapewnienie wszystkim wskaźnikom jednakowego charakteru. Tam, gdzie wskaźnik miał charakter minimentu, dokonano jego konwersji na postać maksymentu (kolumna nazwana jako „wskaźnik ujednolicony”).

Wskaźniki zaproponowane w modelu różnią się pod względem znaczenia dla spełnienia postulatów koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. W związku z tym, wskaźnikom po ich ujednoliceniu postanowiono nadać odpowiadające im współczynniki wagowe (kolumna „waga ujednoliconych wskaźników”). Aby wyznaczyć ich wartości przeprowadzono ustrukturyzowane badanie eksperckie oparte na metodzie delfickiej. Do udziału w badaniu zaproszono 15 ekspertów będących pracownikami naukowymi (ze stopniem minimum doktora), którzy są specjalistami w zakresie problematyki gospodarki o obiegu zamkniętym i oddziaływań środowiskowych generowanych przez obiekty techniczne. Ekspertom przekazano formularz badania (zamieszczony w załączniku 1 do niniejszej rozprawy). Ich zadaniem było nadanie poszczególnym wskaźnikom wag odzwierciedlających ich znaczenie z perspektywy szerokiego spektrum działań podejmowanych zgodnie z koncepcją GOZ. Eksperci przypisywali każdemu kryterium (wskaźnikowi) odpowiednią wagę posługując się wyłącznie wartościami dyskretnymi: 0,25; 0,15; 0,10; 0,05; 0,025; 0,00. Każdy ekspert był proszony o taki rozdział wag pomiędzy wszystkie analizowane kryteria, aby suma przypisanych wag wynosiła 1.

Po wypełnieniu formularzy przez ekspertów, zebrane odpowiedzi poddano analizie, ze szczególnym uwzględnieniem poziomu zgodności odpowiedzi. Przyjęto, że wynik badania uznany zostanie za wiarygodny, gdy procent zgodności odpowiedzi ekspertów będzie równy lub większy niż 75%. Okazało się, że wyniki pierwszej rundy badania charakteryzowały się istotnym zróżnicowaniem ocen ekspertów, gdyż poziom zgodności odpowiedzi dla większości kryteriów był mniejszy niż 75%. Podjęto zatem decyzję o konieczności przeprowadzenia drugiej rundy badania posługując się formularzem (zał. 3) zawierającym poza pytaniami informacje o wynikach pierwszej rundy (wartości mediany oraz poziomu zgodności ocen dla każdego wskaźnika). W drugiej rundzie badania osiągnięto poziom zgodności stanowisk ekspertów (dla każdego z kryteriów) mieszczący się w przedziale 80-100%. W związku z tym badanie z udziałem ekspertów zakończono na drugiej rundzie.

Formularze zastosowane w badaniu z udziałem ekspertów oraz osiągnięte rezultaty badania przedstawiono w załączniku 3. Wagi przypisane przez ekspertów poszczególnym

kryteriom modelu oceny cyrkularności zaprezentowano w tabeli 4.2 w kolumnie „waga ujednoliconego wskaźnika”.

Tab. 4.2. Zestaw wskaźników uwzględnionych w modelu oceny cyrkularności jachtu

Lp.	Wskaźnik (nazwa)	Oznaczenie wskaźnika	Charakter wskaźnika	Wskaźnik ujednolicony	Waga ujednoliconego wskaźnika
1	intensywności użytkowania	W_T	max	W_T	0,15
2	zastosowania materiałów pierwotnych	W_{RM}	min	$1 - W_{RM}$	0,1
3	uciążliwości środowiskowej materiałów	W_E	min	$1 - W_E$	0,15
4	minimalizacji masy	W_m	max	W_m	0,05
5	zastosowania komponentów recykulowanych	W_U	max	W_U	0,05
6	potencjału do ponownego użycia	W_{Reu}	max	W_{Reu}	0,1
7	naprawialności	W_{Rep}	max	W_{Rep}	0,1
8	potencjału do remanufacturingu	W_{Rem}	max	W_{Rem}	0,1
9	potencjału do pełnienia innych funkcji	W_{Pur}	max	W_{Pur}	0,05
10	zdatności do recyklingu	W_{Rec}	max	W_{Rec}	0,1
11	zdatności do utyliczacji termicznej	W_{Inc}	max	W_{Inc}	0,05

Opisane założenia do budowy modelu oceny cyrkularności jachtu, których wyniki przedstawiono w tab. 4.2. pozwalają na scharakteryzowanie jachtu przez pryzmat 11 kryteriów ściśle związanych z różnymi aspektami gospodarki o obiegu zamkniętym. Zastosowanie modelu w praktyce wskazuje, pod jakim względem i w jakim stopniu jacht odpowiada założeniom koncepcji GOZ. Porównywane są w nim wyniki dla poszczególnych kryteriów, tzn. wartości wskaźników po ich ujednoliceniu (nadaniu im charakteru maksymentu). Im wartość ujednoliconego wskaźnika jest bliższa jedności, w tym większym stopniu spełnienie kryterium odpowiada założeniom koncepcji GOZ.

Współczynniki wagowe zaproponowane w tabeli 4.2 nabierają praktycznego znaczenia w sytuacji, gdy szczegółowy obraz spełnienia poszczególnych kryteriów cyrkularności (charakterystyka pokazująca wartości poszczególnych ujednoliconych wskaźników) zamierza się sprowadzić do postaci sumarycznego wskaźnika cyrkularności W_S . Tak sformułowany sumaryczny wskaźnik cyrkularności przyjmuje postać opisaną poniższym wzorem:

$$W_S = 0,15 \times W_T + 0,1 \times (1 - W_{RM}) + 0,15 \times (1 - W_E) + 0,05 \times W_m + 0,05 \times W_U + 0,1 \times W_{Reu} + 0,1 \times W_{Rep} + 0,1 \times W_{Rem} + 0,05 \times W_{Pur} + 0,1 \times W_{Rec} + 0,05 \times W_{Inc} \quad (4.12)$$

Oznaczenia przyjęte w przedstawionej zależności opisującej wartość sumarycznego wskaźnika cyrkularności wynikają z zapisów tabeli 4.2 oraz treści rozdziału 4.2 rozprawy. Zaproponowany wskaźnik, podobnie jak jego składowe, jest bezwymiarowy i przyjmuje wartości z przedziału $<0, 1>$.

4.4. Klasyfikacje związane z modelem oceny cyrkularności

4.4.1. Typologia komponentów jachtu

W związku z pracami dotyczącymi opracowania modelu oceny cyrkularności jachtów (rozdz. 4.1 i 4.2) zasadne okazało się opracowanie klasyfikacji, która w przejrzysty sposób usystematyzuje informacje dotyczące typowych podzespołów występujących w jachtach i pozwoli na ich przyporządkowanie do określonych komponentów. Jej celem jest przede wszystkim ułatwienie prac osobom, które miałyby opracowany model oceny cyrkularności jachtu stosować w praktyce. Za punkt wyjścia w przygotowaniu klasyfikacji przyjęto definicję architektury produktu według Ulricha, Eppingera i Yanga [92], zgodnie z którą architektura produktu to sposób, w jaki elementy funkcjonalne są grupowane w fizyczne moduły stanowiące podstawowe bloki konstrukcyjne produktu lub całej rodziny produktów [92]. Przyjmując tę perspektywę, zidentyfikowano pięć modułów funkcjonalno-materialnych jachtu, w których wymiar „co robi” (funkcja) łączy się z wymiarem „z czego jest zrobiony” (materiał). Takie podejście jest zgodne z normą ISO 20887 (Design for Disassembly & Adaptability) [N.8] oraz metodyką CTI 3.0 [I.12], które podkreślają równorzędne znaczenie funkcji i materiału w projektowaniu strategii cyrkularności produktu (ponowne użycie, remanufacturing, recykling).

Do zebrania informacji o podzespołach składających się na konstrukcje jachtowe wykorzystano wyniki przeprowadzonej inwentaryzacji trzech rzeczywistych, aktualnie budowanych jednostek pływających. Są to:

- jednokadłubowy jacht żaglowy typu szkuner,
- katamaran żaglowy,
- katamaran motorowy.

Jednostki te uznano za reprezentatywne ze względu na ich różny charakter co do przeznaczenia i wykorzystanych rozwiązań konstrukcyjnych. Wśród wybranych

jednostek znalazł się bowiem jacht żaglowy reprezentujący flotę tradycyjną, morski, aluminiowy katamaran żaglowy i katamaran reprezentujący szybko rozwijające się konstrukcje niskoemisyjne. Informacje na temat wymienionych jednostek, które stały się podstawą opracowania uniwersalnej typologii komponentów jachtu zawarto w tabeli 4.3.

Tab. 4.3. Porównanie wybranych jednostek pływających

Kryterium wyboru	Jacht żaglowy typu szkuner	Katamaran żaglowy	Katamaran motorowy
Typ kadłuba	monohull	multihull (sail)	multihull(power)
Materiał konstrukcyjny	stal	aluminium	aluminium
Rodzaj napędu	pełny napęd wiatrowy + silnik spalinowy	pełny napęd wiatrowy + napęd silnikowy	napęd elektryczny z ogniwem paliwowym i generatorem z silnikiem spalinowym
Przeznaczenie	rejsy oceaniczne (jacht klasy A)	rejsy dalekomorskie turystyczne	greencharter, ekspedycja przybrzeżna
Wielkość jednostki	długość – 18 m szerokość – 6,05	długość – 18 m szerokość – 9,25	długość – 13,5 m szerokość – 7,5 m

Wyboru wymienionych jednostek dokonano kierując się następującymi kryteriami reprezentatywności, aby zapewnić możliwie największą przydatność typologii dla całej branży jachtowej. W tym zakresie zwrócono uwagę na:

- typ kadłuba – uwzględniono zarówno klasyczny jednokadłubowiec, jak i dwa katamarany, dzięki czemu próba odzwierciedla szerokie spektrum rozwiązań strukturalnych spotykanych w jachtach rekreacyjnych i użytkowych,
- materiał konstrukcyjny – dobrano konstrukcje oparte na stali oraz aluminium, czyli materiałach pokrywających ok. 80 % produkcji jachtów o długości przekraczającej 14 m, dla których jest uzasadnione poszukiwać odmiennych ścieżek cyrkularności,
- rodzaj napędu – w zestawieniu ujęto napęd żaglowy wspomagany silnikiem diesla oraz napęd hybrydowy uwzględniający wykorzystanie ogniwa paliwowego H₂, który może być wspomagany zasilaniem z klasycznego agregatu prądotwórczego,
- przeznaczenie – wybrano jednostki przeznaczone do oceanicznej ekspedycji (jacht klasy A), morskiego czarteru turystycznego i tzw. jednostkę offshorową (np. do obsługi farm wiatrowych),
- wielkość jednostki – wybrane jednostki mają długość w zakresie 14–18 m i wpisują się w klasę „small craft < 24 m”; reprezentują najliczniejszy, formalnie zdefiniowany segment światowej floty jachtowej,
- dostępność dokumentacji – dla każdej jednostki pozyskano kompletne, porównywalne listy wykorzystanych materiałów i podzespołów oraz rysunki techniczne,

- trendy rynkowe – uwzględniono istotne kierunki rozwoju branży jachtowej, np. dynamiczny wzrost sprzedaży katamaranów żaglowych przeznaczonych do czarteru w latach 2022–2030 [I.10] oraz upowszechnianie napędów hybrydowych i zeroemisyjnych w segmencie 11-18 m.

Na podstawie dostępnej dokumentacji technicznej (listy inwentaryzacyjne i rysunki techniczne) wybranych jednostek zidentyfikowano komponenty, które zestawiono w ramach pięciu grup funkcjonalno-materiałowych nazwanych kategoriami komponentów w strukturze jachtu. Warunkiem uwzględnienia komponentu w tak powstałej typologii było jednoznaczne przypisanie mu czterech atrybutów:

- funkcji dominującej w architekturze jachtu (powinna ona określać główną rolę komponentu w realizacji podstawowych operacji jednostki),
- masy (masa stanowi podstawę bilansu materiałowego oraz umożliwia ocenę wpływu na środowisko),
- materiału konstrukcyjnego lub dominującej kombinacji materiałów (umożliwia to przypisanie do klasy uciążliwości środowiskowej, stopnia podatności recyklingowej oraz zdolności do spalania),
- prognozowanej trwałości jako czasu eksploatacji określonego przez producenta (jest ona podstawą obliczeń dotyczących wykorzystania jachtu i spełnienia przez niego przypisanych mu funkcji).

Trafność i użyteczność opracowanej taksonomii zostały zweryfikowane przez pięciu inżynierów pracujących w branży stoczniowej. Każdy z nich otrzymał listę komponentów, które miał przypisać do określonej kategorii lub zaproponować nową kategorię. Rozbieżności we wskazaniach dokonanych przez inżynierów poddano rozstrzygnięciu przez eksperta – doświadczonego kapitana z przygotowaniem inżynierskim. W ten sposób powstała lista komponentów, którą przedstawiono w tabeli 4.4.

Tab. 4.4. Typologia komponentów występujących w konstrukcji jachtów

Kategorie komponentów	Komponenty jachtów
Komponenty bryły jachtu	Kadłub Balast Pokład Nadbudówka Pływaki (katamarany, trimarany)
Komponenty zabudowy wnętrza	Poszycie ścian i umeblowanie Zejściówki Bakisty Skajlajty Stoliki i siedziska Kojy
Komponenty takielunku	Maszty Olinowanie stałe Olinowanie ruchome Żagle

	Osprzęt pokładowy
Komponenty napędu i sterowania	Silnik spalinowy (diesel/benzyna) Silnik elektryczny Przeniesienie napędu (przekładnia, wał, śruba) Agregat prądotwórczy Układ sterowania (mechaniczny / hydrauliczny / / elektryczny)
Komponenty instalacji jachtowych	Instalacja wodno-kanalizacyjna Instalacja elektryczna, w tym akumulatory, przewody, bezpieczniki, gniazda, GTR itd. Instalacja hydrauliczna Instalacja paliwowa (zbiorniki, węże, pompy itd.) Instalacja wentylacyjna Instalacja grzewcza i klimatyzacyjna Instalacja przeciwpożarowa
Systemy jachtowe (pozostałe)	System nawigacyjne System komunikacyjne System bezpieczeństwa System przeciwpożarowy

4.4.2. Klasyfikacja materiałów ze względu na uciążliwość środowiskową

Na potrzeby wyznaczania wskaźnika uciążliwości środowiskowej materiałów zastosowanych w budowie jachtu (rozdz. 4.2) postanowiono opracować klasyfikację, która dzieliłaby materiały ze względu na kryterium poziomu negatywnych oddziaływań środowiskowych generowanych w perspektywie cyklu życia, czyli uciążliwości środowiskowej. Zainspirowano się w tym zakresie podstawami metodycznymi opracowanymi przez Wimmera, który w publikacji [100], zaproponował podział materiałów na 8 klas. Każda z klas odzwierciedla inny poziom negatywnego wpływu na środowisko oraz możliwość zastosowania materiału w procesach projektowania ekologicznego.

Analizując propozycję Wimmera z perspektywy jej ewentualnego zastosowania w kształtowaniu obiektów technicznych branży jachtowej uznano, że jego klasyfikacja nie jest kompletna. Wymaga ona modyfikacji i rozszerzenia o materiały, które są współcześnie wykorzystywane w tej branży. Wybór materiałów uzupełniających klasyfikację Wimmera oparto na inwentaryzacji elementów konstrukcyjnych i funkcjonalnych trzech jednostek referencyjnych, o których informacje przedstawiono w rozdziale 4.4.1. Posłużono się również w tym zakresie bazami danych Ecoinvent [100].

Dla materiałów, które zebrano w celu ich pogrupowania w klasyfikacji materiałowej wyznaczono wskaźnik wyrażony w punktach środowiskowych [Pkt] na 1 kg. W tym działaniu posłużono się wynikami obliczeń metodą LCA. Zróżnicowanie wyników obliczeń obciążeń środowiskowych generowanych przez użycie materiałów zaproponowanych do klasyfikacji sprawiło, że zasadne okazało się dokonanie podziału materiałów na 10 (a nie 8 jak u Wimmera) klas.

Przypisanie materiałów do poszczególnych klas rozpoczęto od ich uporządkowania ze względu na poziom generowanych negatywnych obciążeń środowiskowych. Wykonano obliczenia, w których zastosowano metodę oceny oddziaływań środowiskowych *Product Environmental Footprint* – EF 3.1 opracowaną na zlecenie Komisji Europejskiej w drodze szerokich konsultacji eksperckich. Przyjęta metoda umożliwia uzyskanie wyników na różnych poziomach obliczeń (charakteryzowania, normalizowania i ważenia) oraz odzwierciedla wpływ środowiskowy na wielu obszarach, m.in. w zakresie zmian klimatu, eutrofizacji (w różnych środowiskach), zużycia zasobów, ekotoksyczności, zakwaszenia czy wyczerpywania zasobów wodnych. Wyniki przeprowadzonych obliczeń pozwoliły na hierarchizację materiałów od tych, które cechuje najniższa uciążliwość środowiskowa do tych, dla których uciążliwość środowiskowa jest najwyższa. Następnie ustalono progi graniczne, a tak powstałym przedziałom przypisano odpowiednie numery klas. Przyjęte progi graniczne przedstawiono w tabeli 4.5.

Tab. 4.5. Poziomy uciążliwości środowiskowej materiałów przypisane poszczególnym klasom

Klasy	Przedziały wartości poziomów uciążliwości środowiskowej [Pkt/kg] wg EF 3.1
1	$x < 0,0000025$
2	$0,0000025 \leq x < 0,000025$
3	$0,000025 \leq x < 0,00025$
4	$0,00025 \leq x < 0,00075$
5	$0,00075 \leq x < 0,005$
6	$0,005 \leq x < 0,05$
7	$0,05 \leq x < 0,25$
8	$0,25 \leq x < 1,75$
9	$1,75 \leq x < 10$
10	$x \geq 10$

Rezultaty przypisania materiałów do poszczególnych klas w opracowanej klasyfikacji przedstawiono w tab. 4.6. Zachowano przy tym podział na trzy główne rodzaje materiałów: metale, tworzywa sztuczne i pozostałe materiały.

Tab. 4.6. Klasyfikacja materiałów proponowana do wykorzystania w branży jachtowej

Materiały Klasa	Metale	Tworzywa	Inne
1			Woda Gips

			Piasek
2		Włókno poliestrowe PVC wysokonakładowe	
3	Stal zwykła Stal niskostopowa Żeliwo	HDPE PVC miękkie PVC sztywne LDPE	Płyta gipsowo-kartonowa Beton lekki Szkło piankowe Bitum Szkło płaskie powlekane Wełna kamienna Korek
4	Stal nierdzewna Ferrochromium	PVC miękkie GPPS Styropian HIPS Pianka PE PET SAN Guma polibutadien Polibutylen Uszczelnienia Guma SBR Guma EPDM ABS PA66 GF33 Polistyren XPS PVCD GFRP Poliwęglan Pianka poliuretanowa miękka Nylon 66 Pianka poliuretanowa sztywna Nylon 6.6 Żywica poliestrowa Żelkot PA poliamid PS Poliester Silikon Szpachlówka	Wełna szklana Włókno jedwabne Włókno linane Kamień naturalny cięty Pianka polistyrenowa EPS/XPS Włókno wiskozowe Farba elektrostatyczna Ceramika sanitarna/porcelana Włókno bawełniane organiczne Izolacje rur z elastomenu Farba alkiolowa Włókno szklane
5	Stopy aluminium z Mg Ferronikiel Aluminium pierwotne	Polifenyloeter Polipropylen Żywica epkosiydowa Klej żywiczny	Włókno bawełniane Lakier akrylowy

	Stopy niklu Ołów Cynk Stopy cynku Chrom Stopy tytanu Stopy aluminium z Li Stopy magnezu		
6	Nikiel Mosiądze Brązy Miedź pierwotna Stopy miedzi Stopy ołowiu (lut w prętach)	CFRP	Pływa wiórowa Płyta LFD Okładzina Drewno konstrukcyjne Płyta OSB Włókno węglowe
7			Płyta MDF Sklejka Płyta HDF
8	Srebro		
9	Pallad		
10	Platyna Rod Złoto		

Jak wynika z powyższej klasyfikacji im wyższy numer klasy tym większe jest niekorzystne oddziaływanie środowiskowe materiałów. Kolejne klasy obejmują:

- klasa 1 – materiały naturalne lub w pełni zdadne do recyklingu, biodegradowalne lub bezpieczne dla środowiska, których produkcja nie powoduje dużego zużycia energii,
- klasa 2 – materiały wtórne lub łatwe do odzyskania, które charakteryzują się umiarkowaną energochłonnością,
- klasa 3 – materiały o większym zużyciu energii (szczególnie w produkcji), które są jednak łatwe do recyklingu,
- klasa 4 – materiały zawierające często mieszanki lub domieszki, które są trudniejsze do przetwarzania w recyklingu,
- klasa 5 – materiały energochłonne w procesie produkcji i trudne do przetworzenia w recyklingu, choć często o wysokim potencjale do separacji i segregacji,
- klasa 6 – materiały trudne w odzysku, toksyczne i złożone chemicznie,
- klasa 7 – materiały złożone, hybrydowe, zawierające substancje niebezpieczne, o niskiej trwałości,
- klasa 8 – materiały oparte na surowcach strategicznych, których recykling wiąże się ze znacznym obciążeniem środowiska,
- klasa 9 – materiały oparte na surowcach rzadko występujących w przyrodzie, które wymagają dużych nakładów energetycznych podczas wydobywania i przetwarzania,

- klasa 10 – materiały oparte na metalach rzadkich o dużej wartości, trudnych w odzysku i wysoce energochłonnych.

4.4.3 Klasyfikacja komponentów ze względu na podatność recyklingową

Jak wskazano w rozdziale 4.1 rozprawy, recykling jednostek pływających jest jednym z pożądanych sposobów postępowania z jachtami wycofanymi z eksploatacji. Proces ten jest jednak stosowany w ograniczonym zakresie ze względu na liczne bariery, np. złożoność konstrukcji, dominację materiałów kompozytowych w niektórych elementach jachtów, obecność nierozłącznych połączeń oraz trudnych w odzysku materiałów. W każdym jachcie można zidentyfikować komponenty, których technologie recyklingu są szeroko rozpowszechnione (np. konstrukcje i osprzęt wykonane z metali, wyposażenie szkieletowe wykonane z drewna, sprzęt elektrotechniczny) oraz takie, których recykling jest stosowany na skalę marginalną (np. kadłuby wykonane z materiałów kompozytowych).

Prace nad klasyfikacją recyklingową materiałów znajdujących zastosowanie w budowie jednostek pływających rozpoczęto od przeglądu literatury, w ramach którego poszukiwano wyników badań dotyczących oceny podatności do recyklingu różnych materiałów i elementów konstrukcyjnych stosowanych w obiektach technicznych. Okazało się, że takie badania były już podejmowane, jednak wskazywały one na złożoność czynników wpływających na scenariusze recyklingu. Wytyczne w tym zakresie dostarcza publikacja European Commission, Ecodesign for sustainable products regulation and textiles strategy [S.5], która jako opracowanie przygotowane w ramach Join Research Centre wskazuje rekomendowane praktyki, zgodne z założeniami koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. W zawartych w publikacji propozycjach wskazuje się na konieczność uwzględnienia w ocenie podatności do recyklingu:

- możliwości demontażu komponentu,
- stopnia jego zanieczyszczenia, w tym również zanieczyszczenia użytych w nim materiałów,
- stopnia degradacji materiałów zastosowanych w komponencie.

Kwestie związane z możliwościami demontażu komponentu uwzględniane są na różne sposoby także w innych publikacjach. Wskazuje się w nich m.in., że możliwość demontażu komponentu jest warunkiem dopuszczenia oceny podatności do recyklingu [2, 18] lub też, że stopień demontażu powinien być uwzględniony w analizie ilościowej możliwości recyklingu [96, 97, 98].

Biorąc to pod uwagę stwierdzono, że uwzględnienie podatności do demontażu komponentów jachtu w ocenie ich podatności recyklingowej miałoby sens tylko pod warunkiem, że istniałaby kompleksowa klasyfikacja materiałów (uwzględniająca ich podatność recyklingową), które są stosowane w obiektach technicznych. W związku z tym, że w literaturze takiej klasyfikacji nie znaleziono, postanowiono zrezygnować nie tylko z analizowania scenariuszy demontażu każdego z komponentów jachtu, ale także zrezygnowano z analizowania ilościowego stopnia zanieczyszczenia i/lub degradacji użytych w nich materiałów. Dostępne publikacje dotyczyły jedynie przypadków znacząco odbiegających od branży jachtowej, np. dotyczących branży opakowaniowej

lub elektronicznej i nie zawierały parametrów niezbędnych do oszacowania zdolności recyklingowej komponentów stosowanych w konstrukcjach jachtowych.

Z uwagi na brak odpowiednich danych literaturowych postanowiono przeprowadzić ustrukturyzowane badanie eksperckie oparte na metodzie delfickiej. Do udziału w nim zaproszono 15 ekspertów znających się na różnych technologiach recyklingu obiektów technicznych. Ekspertom przekazano formularz badania (załącznik 2 do niniejszej rozprawy), w którym zamieszczono listę typowych komponentów jachtowych występujących w wariantach wykonania z różnych materiałów. Zadaniem ekspertów było przypisanie tym komponentom klas podatności recyklingowej zdefiniowanych w zaproponowanej pięciopunktowej skali. W tej skali znalazły się:

- klasa 1 – komponenty nierecyklingowalne,
- klasa 2 – komponenty o niskiej zdolności do recyklingu,
- klasa 3 – komponenty umiarkowanie recyklingowalne,
- klasa 4 – komponenty o wysokiej zdolności do recyklingu,
- klasa 5 – komponenty w pełni recyklingowalne.

Po wypełnieniu formularzy przez ekspertów, zebrane odpowiedzi poddano analizie, w której szczególnie zwrócono uwagę na wartości mediany i procent zgodności odpowiedzi. Zgodnie z założeniami metody delfickiej przyjęto, że wynik badania uznany zostanie za wiarygodny, gdy procent zgodności odpowiedzi ekspertów będzie równy lub większy niż 75% dla każdego komponentu wskazanego w formularzu badania ankietowego. W wyniku przeprowadzonej analizy okazało się, że już w pierwszej rundzie badania poziom zgodności odpowiedzi ekspertów mieścił się w przedziale od 80% do 100%. W związku z tym nie było konieczne przeprowadzenie drugiej rundy badania. Szczegółowe informacje dotyczące analizy wyników badania ankietowego przedstawiono w załączniku 2, zaś wynik badania w postaci opracowanej klasyfikacji komponentów jachtowych ze względu na ich podatność recyklingową zawiera poniższa tabela 4.7.

Tabela 4.7. Klasyfikacja komponentów jachtowych ze względu na ich podatność recyklingową

Komponenty jachtowe	Klasa
Kadłub laminatowy	2
Kadłub stalowy	5
Kadłub aluminiowy	5
Kadłub drewniany	3
Balast wykonany z ołowiu	4
Balast ze stali lub żeliwa	5
Balast kompozytowy	2
Pokład laminatowy	2
Pokład stalowy	5
Pokład aluminiowy	5
Pokład drewniany	3

Nadbudówka laminatowa	2
Nadbudówka stalowa	5
Nadbudówka aluminiowa	5
Nadbudówka drewniana	3
Skajlajty ze szkła organicznego	3
Elementy zabudowy wnętrza z laminatu	2
Elementy zabudowy wnętrza ze stali	5
Elementy zabudowy wnętrza z aluminium	5
Elementy zabudowy wnętrza z drewna	3
Omasztowanie ze stopów aluminium	5
Omasztowanie stalowe	5
Omasztowanie drewniane	3
Omasztowanie z kompozytów	2
Liny stalowe	5
Liny z włókien syntetycznych	4
Liny z włókien naturalnych	2
Pręty i profile stalowe	5
Pręty i profile ze stopów aluminium	5
Żagle z poliestru	3
Żagle z kevlaru	2
Żagle z włókien węglowych	2
Żagle z nylonu	3
Żagle z włókien naturalnych	2
Osprzęt pokładowy - elementy z laminatu	2
Osprzęt pokładowy - elementy z drewna	3
Osprzęt pokładowy - elementy z metalu	5
Silnik (diesel lub benzynowy)	4
Silnik elektryczny	4
Przeniesienie napędu (przekładnia, wał, śruba itd.)	5
Agregat prądotwórczy	4
Akumulatory	4
Instalacja wodno-kanalizacyjna	3
Instalacja elektryczna	3
Inst. hydrauliczna – elementy z metalu	4
Inst. hydrauliczna – elementy z tworzyw	3
Instalacja wentylacyjna	3
Instalacja grzewcza i klimatyzacyjna	3
Instalacja paliwowa	2
Instalacja nawigacyjna i komunikacyjna	4
Instalacja przeciwpożarowa	3
Wyposażenie dot. bezpieczeństwa zbiorowego z laminatu (np. szalupy, obudowy tratw ratunkowych)	2

Wyposażenie dot. bezpieczeństwa zbiorowego z tworzyw organicznych (np. ponton tratwy, namiot osłaniający)

3

4.4.4. Klasyfikacja materiałów ze względu na podatność do utylizacji termicznej

Jak zaznaczano już w niniejszej pracy, spalanie z perspektywy gospodarki o obiegu zamkniętym stanowi najmniej korzystny wariant zapewnienia cyrkularności i powinno dotyczyć tylko tych materiałów, do których nie mogą być stosowane inne formy końcowego zagospodarowania, w tym szczególnie recykling mechaniczny lub chemiczny. W związku z tym stosowanie spalania powinno być ograniczone do absolutnego minimum. Podobnie, jak w wielu innych dziedzinach, tak i w przypadku obiektów branży jachtowej zdarzają się sytuacje braku alternatywnych rozwiązań. W przypadku odpadów jachtowych, wysoki potencjał energetyczny cechuje takie materiały, jak kompozyty polimerowe, pianki poliuretanowe, tworzywa sztuczne i odpady drewniane [40]. Ich odpowiednie zagospodarowanie w procesach spalania z odzyskiem energii, pirolizy lub zgazowania może więc stanowić alternatywne źródło energii. W określeniu potencjału energetycznego materiałów stosowanych w jachtach jako parametr odniesienia przyjęto wartość opałową. Zebrane informacje przedstawiono w tabeli 4.8.

Tab. 4.8. Wartości opałowe wybranych grup materiałów (opracowanie na podstawie [40])

Materiał	Wartość opałowa (MJ/kg)
Stal nierdzewna, stal stopowa, stopy aluminium, brąz, mosiądz, tytan, nikiel, magnez, złoto, srebro, platyna, pallad	0
Beton, gips, porcelana, szkło hartowane, szkło płaskie, włókno szklane	0
Drewno tekowe, mahoniowe, sklejka morska, drewno konstrukcyjne	12–18
Papier, karton, linoleum	14–16
Skóra (naturalna, impregnowana)	14–18
Kompozyty GFRP (włókno szklane)	15–25
Kompozyty CFRP (włókno węglowe – żywica)	20–30
Pianki polimerowe (poliuretanowe PUR, PET, fenolowe)	20–30
Tworzywa sztuczne (polichlorek winylu PVC, poliwęglan PC, Kevlar)	22–27
ABS (akrylonitryl-butadien-styren), PS (polistyren, EPS, HIPS, GPPS), PA (poliamid – nylon), PMMA (akryl)	30–35
Pianki PUR, EPS o wysokiej gęstości	25–30
Poliolefiny (PE – polietylen, PP – polipropylen, XPS – ekstrudowany polistyren)	43–45
Olej opałowy, benzyna, paliwa ciekłe	40–45

Dane przedstawione w tabeli 4.8 posłużyły do zaproponowania podziału materiałów na 5 klas ze względu na ich wartość opałową (tab. 4.9).

Tab. 4.9. Klasy materiałów ze względu na wartość opałową

Klasa	Przedział wartości opałowej (MJ/kg)	Przykładowe materiały
I	$x < 0$	Woda, Gips, Piasek, Beton lekki, Stal zwykła, Stal niskostopowa, Żeliwo, Stal nierdzewna, Stal węglowa, Szkło piankowe, Szkło płaskie powlekane, Kamień naturalny cięty, Ceramika sanitarna / porcelana, Farba elektrostatyczna, Uszczelnienia, Włókno szklane, Wełna szklana, Wełna kamienna, Aluminium pierwotne, Stopy aluminium z Mg, Stopy aluminium z Li, Stopy magnezu, Stopy niklu, Ferronikiel, Ferrochromium, Chrom, Cynk, Stopy cynku, Ołów, Stopy ołowiu (lut w prętach), Stopy tytanu, Miedź pierwotna, Stopy miedzi, Mosiądze, Brązy, Nikiel, Srebro, Złoto, Platyna, Pallad, Rod,
II	$0 \leq x < 20$	Drewno konstrukcyjne, Sklejka, Płyta OSB, Płyta MDF, Płyta HDF, Płyta wiórowa, Płyta LFD, Włókno bawełniane, Włókno bawełniane organiczne, Włókno lniane, Włókno wiskozowe, Włókno jedwabne, Izolacje rur z elastomeru, Korek, Płyta gipsowo-kartonowa
III	$20 \leq x < 30$	PVC miękkie, PVC sztywne, PVC wysokonakładowe, PVCD, Poliwęglan (PC), Pianka poliuretanowa miękka, Pianka poliuretanowa sztywna, PET, SAN, Guma SBR, Guma EPDM, Żywica poliestrowa, Żywica epoksydowa GFRP, CFRP, Włókno węglowe, Polifenyloeter (PPE) Polibutylen (PB), Okładzina, Farba alkidowa, Lakier akrylowy, Bitum, Włókno poliestrowe, Guma polibutadien, szpachlówka, żelkot, klej żywiczny, silikon
IV	$30 \leq x < 40$	ABS, GPPS, HIPS, Styropian, Polistyren XPS, PA66 GF33, Nylon 66 / Nylon 6.6, Pianka polistyrenowa, EPS/XPS, Polistyren PS, Poliamid PA,
V	$x \geq 40$	HDPE, LDPE, Polipropylen (PP), Polietylen, Pianka PE

W ocenie zdolności do spalania materiałów jachtowych oparto się na założeniu, w myśl którego rosnąca wartość opałowa jest odzwierciedleniem większej zdolności do spalania. Odnosząc się bezpośrednio do wartości opałowej materiałów, wyróżniono zatem 5 klas materiałów według kryterium ich zdolności do spalania. Są to:

- klasa 1 – materiały nie wykazujące potencjału energetycznego,
- klasa 2 – materiały o niskim potencjale energetycznym,
- klasa 3 – materiały o umiarkowanym potencjale energetycznym,
- klasa 4 – materiały o wysokim potencjale energetycznym,
- klasa 5 – materiały o bardzo wysokim potencjale energetycznym.

Opracowanie klasyfikacji materiałów ze względu na zdolność do spalania pozwala na ocenę zasadności i efektywności wykorzystania odpadu jako źródła energii na ostatnim „poziomie” hierarchii postępowania z odpadami. Nie każdy materiał powinien być jednak spalany ze względów technologicznych i środowiskowych. Brak jasnych

kryteriów kwalifikacji odpadu do spalania prowadzi w praktyce do niekorzystnych decyzji, które mogą skutkować marnotrawstwem zasobów, nadmiernymi emisjami lub nieuzasadnionym obciążeniem instalacji termicznego przekształcania odpadów.

Zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym, materiały pozostałe po zakończeniu użytkowania produktu nie powinny być traktowane jako odpad, ale jako zasób i to nie tylko w kontekście recyklingu materiałowego, lecz również energetycznego. W sytuacji, gdy dalsze podejmowanie prób zapewnienia obiegu materiałowego nie daje rezultatów lub nie jest uzasadnione, odzysk energii w procesie spalania stanowi ostatnią dopuszczalną formę cyrkularnego zagospodarowania. W tym ujęciu opracowana klasyfikacja materiałów w powiązaniu z masą spalanego odpadu (materiału) staje się elementem ilościowej oceny potencjału resztkowej cyrkularności produktu.

5. WERYFIKACJA MODELU OCENY CYRKULARNOŚCI

5.1. Wybór i charakterystyka obiektu badań

5.1.1. Klasyfikacja jachtów w świetle norm i przepisów

Jednostka pływająca to obiekt zdolny do poruszania się po wodzie i utrzymywania się na jej powierzchni, zaprojektowany do wykonywania określonych funkcji związanych z żeglugą, transportem, rekreacją, połowami, pracami specjalistycznymi lub innym użytkowaniem. Pojęcie to obejmuje zarówno statki morskie, jak i śródlądowe, łodzie, barki, promy, pontony oraz jachty – niezależnie od ich wielkości, napędu czy przeznaczenia [N.25]. Szczególnym rodzajem jednostki pływającej jest jacht przeznaczony do rekreacji, sportu, transportu lub turystyki. Może on być wyposażony w napęd żaglowy, mechaniczny (silnikowy), typu saildrive, elektryczny lub hybrydowy. Jacht może poruszać się po wodach śródlądowych lub morskich [52].

Ze względu na zróżnicowanie konstrukcji i różnorodność pełnionych funkcji, w literaturze przedmiotu nie występuje jedna, powszechnie przyjęta klasyfikacja jachtów. W praktyce klasyfikacyjnej oraz w regulacjach prawnych jachty są porządkowane ze względu na takie kryteria, jak długość, przeznaczenie (rekreacyjne, sportowe, komercyjne) oraz rodzaj akwenu, po którym jacht ma żeglować. Informacje na temat klasyfikacji jachtów zawarte są m.in. w przepisach prawnych (np. Dyrektywa 2013/53/UE [N.5], Kodeks morski [N.14], Ustawa o rejestracji jachtów [N.23]), w normach technicznych [N.17, N.18, N.19] oraz wytycznych towarzystw klasyfikacyjnych. Szczególne kryterium w klasyfikacji jachtów stanowi granica 24 metrów długości kadłuba. Jest to powszechnie przyjmowany próg oddzielający tzw. małe jednostki pływające od statków morskich.

W strukturze klasyfikacyjnej jednostek pływających jacht zajmuje miejsce w ramach podkategorii statki lub łodzie w zależności od długości kadłuba, przeznaczenia, przepisów prawnych oraz rodzaju akwenu [I.1]. Określenie jachtu jako łodzi lub statku pojawia się w kontekście przepisów rejestracyjnych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Przykładowo Regulamin PRS (Polskiego Rejestru Statków) klasyfikuje jednostki powyżej 24 m jako statki rekreacyjne. Z kolei Dyrektywa 2013/53/UE [N.5] mówi o łodziach rekreacyjnych o długości kadłuba od 2,5 m do 24 m, niezależnie od rodzaju napędu. Jednostki powyżej 24 m są wyłączone z tej dyrektywy i podlegają innym regulacjom, m.in. konwencjom międzynarodowym SOLAS i MARPOL [N.15, N.16].

24 metry długości kadłuba to granica pomiędzy tzw. małymi jednostkami pływającymi (ang. small craft), objętymi normami ISO (np. ISO 12217, ISO 8666), dyrektywą RCD oraz systemem kategorii projektowych A–D, a większymi jednostkami definiowanymi jako statki morskie, podlegające innym regulacjom [S.14]. Wskazaną granicę stosuje zarówno Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/53/UE [N.5], jak i zharmonizowane z nią normy techniczne oraz klasyfikacje krajowe (np. PRS i system Reja 24) [S.12].

Jachty należą do złożonych technicznie i funkcjonalnie obiektów w klasie małych jednostek pływających (do 24 m długości), zwłaszcza jeśli są przeznaczone do żeglugi

morskiej. Ich konstrukcja łączy cechy statku transportowego, mobilnego środka mieszkalnego oraz obiektu rekreacyjnego, co wyróżnia je na tle prostszych jednostek, takich jak łodzie wiosłowe, motorówki czy barki śródlądowe. W grupie tych jachtów (o długości do 24 m) występują przede wszystkim jednostki przybrzeżne i śródlądowe. Najliczniejszą grupę w Polsce stanowią jachty śródlądowe przeznaczone do żeglugi na jeziorach, kanałach i rzekach.

Norma PN-EN ISO 1221 różnicuje jednostki o długości kadłuba do 24 m m.in. ze względu na rodzaj napędu, długość kadłuba oraz kategorię projektową. W połączeniu z funkcjonalną typologią (jachty czarterowe, sportowe i szkoleniowe), klasyfikacja jachtów stanowi podstawę do prowadzenia analiz techniczno-eksploatacyjnych i ocen zgodności z wymaganiami bezpieczeństwa i konstrukcji. Opierając się na zapisach normy PN-EN ISO 1221 można przyjąć kilka kryteriów klasyfikacyjnych jachtów, które systematyzują je pod względem konstrukcji i zastosowania [N.17, N.18]. Są to m.in.:

- rodzaj napędu:
 - jachty żaglowe (sailing yachts) – wykorzystują napęd wiatrowy,
 - jachty motorowe (motor yachts) – napędzane silnikiem,
 - jachty żaglowo-motorowe (motorsailers) – z napędem mieszanym,
- rodzaj akwenu:
 - jachty morskie – przystosowane do żeglugi pełnomorskiej,
 - jachty śródlądowe – przeznaczone na rzeki, jeziora, kanały,
 - jachty przybrzeżne – o ograniczonej dzielności morskiej,
- przeznaczenie jachtu:
 - jachty rekreacyjne – do prywatnego użytku (najczęstsze),
 - jachty turystyczne / czarterowe – do komercyjnego wynajmu,
 - jachty sportowe / regatowe – przeznaczone do zawodów sportowych,
 - jachty szkoleniowe – używane w edukacji morskiej,
- rodzaj konstrukcji kadłuba:
 - monohull – jeden kadłub (klasyczny),
 - katamaran – dwa kadłuby,
 - trimaran – trzy kadłuby,
- typ kategorii projektowej:
 - A – oceaniczna,
 - B – pełnomorska,
 - C – przybrzeżna,
 - D – wody osłonięte,
- rodzaj ożaglowania (dla jachtów żaglowych):
 - słup,
 - kecz,
 - jol,
 - szkuner,
 - kuter
 - i inne.

Jak wynika z przedstawionych informacji, granica 24 m długości kadłuba w systematyce jachtów rozdziela jednostki objęte uproszczonymi normami projektowymi od dużych jednostek morskich, cechujących się większą złożonością konstrukcyjną, dla których konieczne jest spełnienie większej liczby wymagań określonych w normach i przepisach prawnych. Ze względu na mniejszy poziom złożoności konstrukcji jednostek o długości do 24 m, w tej właśnie grupie postanowiono poszukiwać obiektów, które posłużą do weryfikacji modelu oceny cyrkularności zaprezentowanego w rozdziale 4 rozprawy.

5.1.2. Wybór obiektu badań

W poszukiwaniu jednostki pływającej, która będzie stanowiła obiekt badań ukierunkowanych na praktyczną weryfikację modelu oceny cyrkularności postanowiono ograniczyć obszar zainteresowań do małych jednostek pływających, które użytkowane są przede wszystkim na wodach śródlądowych i które cechuje prostota konstrukcji. Stwierdzono też, że korzystne byłoby, aby rozważane do analizy jachty mogły być użytkowane rekreacyjnie, jak i traktowane jako jachty regatowe.

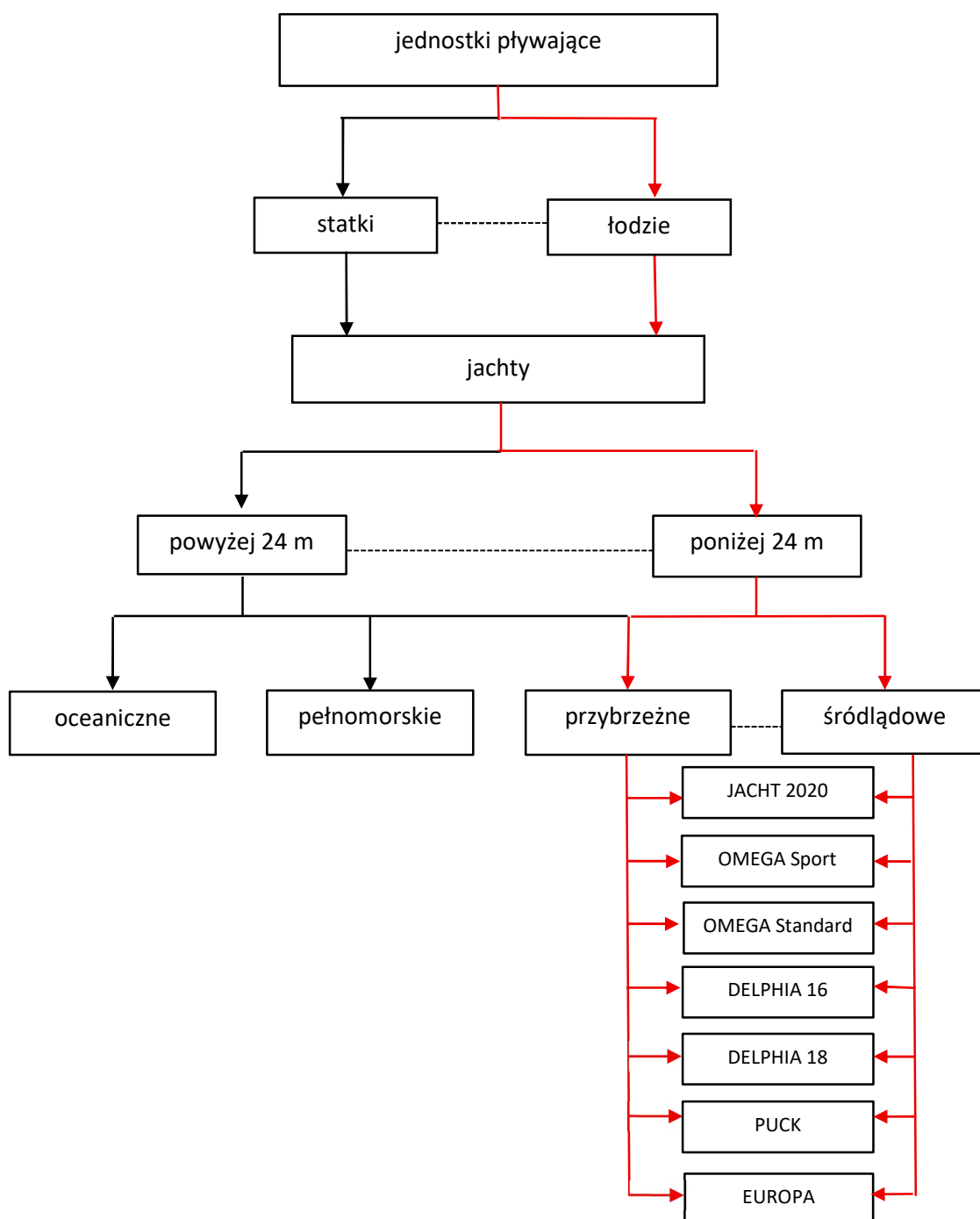
W ramach wyboru jednostki posłużono się takimi kryteriami jak:

- reprezentatywność konstrukcji,
- dostępność danych technicznych i eksploatacyjnych,
- rozpowszechnienie jednostki na rynku,
- dostępność wersji seryjnych w ofercie producentów.

W związku z pierwszym z wymienionych kryteriów wybrany jacht powinien posiadać cechy typowe dla wielu innych jednostek pływających. Dotyczyło to zarówno materiałów zastosowanych w budowie jednostki, jak i cech konstrukcyjnych, jak np. jeden kadłub, czy sposób zapewnienia stateczności. Jako warunek niezbędny do praktycznego zweryfikowania modelu oceny cyrkularności potraktowano posiadanie dostępu do dokumentacji technicznej jednostki. Poziom szczegółowości dostępnej dokumentacji powinien umożliwić wyznaczenie wszystkich wskaźników modelu cyrkularności przy czym dotyczyć to powinno zarówno danych konstrukcyjnych, jak i informacji o typowym przebiegu procesu eksploatacji.

Rynek jednostek pływających cechuje się zróżnicowaniem nie tylko ze względu na konkurowanie ze sobą wielu uznanych producentów. Dużo jest przykładów jednostek, które wytwarzane są samodzielnie przez ich właścicieli. Wynika to z faktu szerokiego udostępniania przez niektórych projektantów dokumentacji projektowej lub sprzedawania dostępu do niej za niewysoką cenę. W konsekwencji, szczególnie jachty cechujące się prostotą konstrukcji powstają często w przydomowych warsztatach. Biorąc to pod uwagę, wśród kryteriów wyboru jednostki znalazło się jej rozpowszechnienie na rynku. Chodziło bowiem o dokonanie wyboru takiej jednostki, która ma potencjał do tego, aby jej produkcja mogła się odbywać na dużą skalę. Wiąże się to z ostatnim z zaproponowanych kryteriów wyboru jednostki, a mianowicie dostępnością wersji seryjnych. Przyjęto, że wybrany jacht nie tylko powinien być dostępny na rynku krajowym lub międzynarodowym, ale w ofercie producenta powinna być dostępna jego wersja, która produkowana jest bez modyfikacji przynajmniej w skali seryjnej.

W związku z przyjętymi założeniami, poszukiwania jednostki pływającej do weryfikacji modelu oceny cyrkularności postanowiono ograniczyć do jednostek kategorii projektowej C zgodnie z Dyrektywą 2013/53/UE. Chodzi tu o jednostki przeznaczone do żeglugi przybrzeżnej oraz śródlądowej – w warunkach wiatru do 6°B i fali do 2 metrów. Tego rodzaju jachty są często wykorzystywane w systemach szkoleniowych i dysponują nimi kluby żeglarskie. Ponadto użytkowane są do celów rekreacyjnych oraz w treningach sportowych na wodach osłoniętych. Miejsce rozważanych do analizy jachtów na tle struktury systemu klasyfikacji jednostek pływających zaprezentowano na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Miejsce jachtów rozważanych do wyboru jako obiektu badań na tle struktury systemu klasyfikacji jednostek pływających [N.5, N.14]

Jak wynika z rys. 5.1, w ostatniej fazie poszukiwań jednostki pływającej do weryfikacji modelu oceny cyrkularności, w zbiorze rozważanych jachtów znalazły się: Jacht 2020, Omega Sport, Omega Standard, Delphia 16, Delphia 18, Puck, Europa. Jednostki te zweryfikowano przez pryzmat przyjętych wcześniej kryteriów wyboru (tab. 5.1). W ocenie poszczególnych jednostek przyjęto, że 2 oznacza spełnienie kryterium w najwyższym stopniu, a 0 oznacza spełnienie kryterium w stopniu najniższym.

Tab. 5.1 Ocena jednostek pływających według przyjętych kryteriów

Jednostka	Kryterium				
	reprezentatywność konstrukcji tj. czy nadal jest użytkowana	dostępność danych technicznych i eksploatacyjnych	rozpoznanie jednostki na rynku tj. ilościowo, ile może być wyprodukowanych sztuk	dostępność wersji seryjnych	SUMA
JACHT 2020	2	2	2	2	8
OMEGA SPORT	2	2	1	2	7
OMEGA STANDARD	2	2	1	2	7
DELPHIA 16	1	1	1	1	4
DELPHIA 18	1	1	1	1	4
PUCK	2	1	2	2	7
EUROPA	1	0	1	1	3

Wyniki porównania wymienionych jednostek pływających pozwoliły na dokonanie wyboru jachtu, który posłuży do szczegółowej weryfikacji modelu oceny cyrkularności opracowanego w niniejszej rozprawie. Jachtem tym jest Jacht 2020 spełniający wszystkie przyjęte kryteria.

5.1.3. Charakterystyka obiektu badań

Jacht 2020 został zaprojektowany na zlecenie gdyńskiej firmy Pro Air Sp. z o.o. Koncepcja jachtu zrodziła się w środowisku osób związanych z Polskim Związkiem Żeglarskim, a jego projektantem został Eugeniusz Ginter. 2020 należy do segmentu jachtów szkoleniowo-rekreacyjnych klasy C. Jest jachtem monotypowym, jednokadłubowym odkrytopokładowym budowanym przez spółkę Pro Air w formach negatywowych metodą technologii infuzji, która zapewnia wysoką powtarzalność konstrukcji. Wygląd Jachtu 2020 przedstawiono na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Jacht 2020 [I.14]

Kadłub jachtu 2020 składa się z trzech, połączonych i współpracujących ze sobą konstrukcyjnie elementów, wykonanych w technologii przekładkowej, z zastosowaniem laminatów poliestrowo-szklanych. Jego maszt i bom zostały wykonane z profili ze stopów aluminiowych anodyzowanych a takielunek stały, okucia i drobny osprzęt – z materiałów odpornych na korozję w wodzie morskiej.

Ożaglowanie wykonano z zastosowaniem materiałów poliestrowych tkanych i stanowią je dwa żagle podstawowe – fokżagiel i grotżagiel. Wyposażenie jachtu w osprzęt umożliwia stawianie spinakera asymetrycznego, a opcjonalnie po uzupełnieniu osprzętu, jacht może żeglować pod spinakerem symetrycznym. Ster pawężowy ma uchylną, blokową podczas żeglugi płetwę sterową, natomiast ciężki obrotowy miecz jest wyposażony w system blokowania podczas żeglugi kontrafałem i talię.

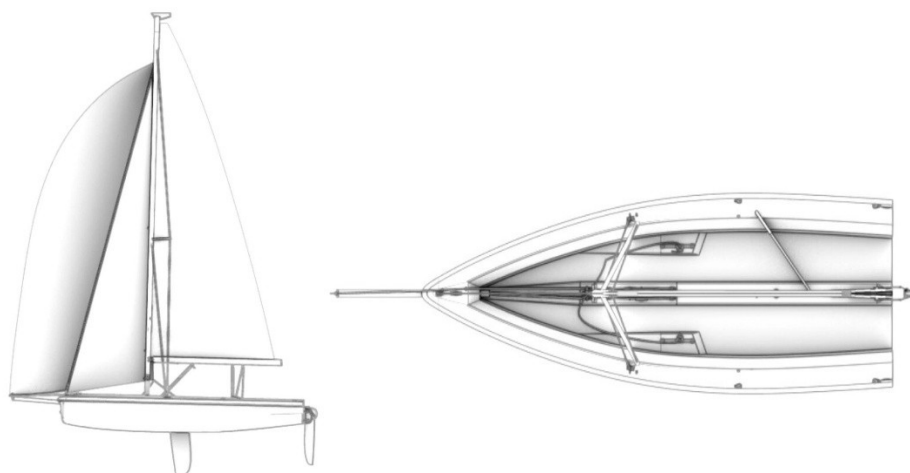
Kryterium niezatapialności jachtu jest spełnione m.in. dzięki dwóm komorom wypornościowym o objętości $V_k = 2 \times 380l$ i przekładce w kadłubie o objętości $V_p = 100l$. Zapewnia to pływalność całkowicie zalanej łodzi wraz z załogą, a otwarta pawęż zapewnia bezpieczną żeglugę, chroniąc kokpit przed zalaniem wodą i utratą stateczności.

Jacht został zaprojektowany i zbudowany tak, aby spełniał warunki eksploatacji odpowiadające kategorii projektowej C. Spełnia warunki żeglowania na przybrzeżnych i zatokowych wodach morskich (2 Mm), jak i wodach śródlądowych, dostępnych do uprawiania żeglarstwa. Kadłub jachtu jest wyposażony w dwa zamykane schowki do przechowywania wyposażenia i bagażu. Jest też przystosowany do zawieszenia na rufie

silnika zaburtowego o mocy do 2,92 kW. Ponadto jego modułowa koncepcja umożliwia zamocowanie w kokpicie siedziska dla osoby z niepełnosprawnością ruchową.

Wyposażenie jachtu w pasy balastowe i opcjonalnie w trapezy, umożliwia trening technik aktywnego balastowania. Odpowiednio wyprofilowany półpokład, ukształtowanie podłogi w kokpicie (pokrytej preparatem antypoślizgowym) oraz duży kokpit tworzą bezpieczne stanowisko pracy dla załogi jachtu. Masa i konstrukcja jachtu umożliwiają jego łatwe i bezpieczne otaklowanie (lub roztaklowanie) oraz prosty załadunek na przyczepę podłodziową.

Projekt jachtu 2020 uwzględnia perspektywę rozwoju całej klasy, od podstawowego poziomu wyposażenia, do zamontowania spinakera asymetrycznego i spinakera symetrycznego z wymaganym osprzętem, jak i w przyszłości zastosowanie hydro-skrzydeł w systemie DSS (Dynamic Stability System). Zastosowanie ciężkiego miecza, poprawiającego parametry statecznościowe jednostki pozwala też na przygotowanie jachtu do regat klasy mistrzowskiej (Mistrzostwa Europy i Świata) w klasie ORC Sportsboat. Jacht 2020 w rzucie z boku i z góry zaprezentowano na rys. 5.3.



Rys. 5. 3. Jacht 2020 w rzucie z boku i z góry [I.14]

Szczegółowe dane techniczne jachtu 2020 to [I.5]:

- długość całkowita 5,86 m,
- szerokość całkowita 1,90 m,
- zanurzenie 0,202/1,025 m,
- masa kadłuba 250 kg,
- masa miecza 70 kg,
- powierzchnia ożaglowania 17,93 m²,
 - grot 11,13 m²,
 - fok 6,80 m²,
 - spinaker asymetryczny 23,20 m²,
- wyporność całkowita 720 kg,
- załoga 2 - 6 osób.

Jacht 2020 jest jednostką zaprojektowaną zgodnie z wymaganiami technicznymi określonymi w rozporządzeniu Ministra Sportu i Turystyki oraz Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 22 maja 2013 r. Jest jednostką rekreacyjną i szkoleniową, przystosowaną do wszechstronnego zastosowania w [I.14, N.22]:

- nauczaniu żeglowania dzieci, młodzieży i dorosłych,
- szkoleniu zaawansowanym i doskonaleniu umiejętności,
- prowadzeniu kursów z wody i z nabrzeża (łódź asekuracyjna),
- regatach (match-racing i zawody flotowe),
- żegludze rekreacyjnej,
- prowadzaniu egzaminów na patenty żeglarskie.

Jacht 2020 jest produkowany w trzech wariantach – Regular, Sport i Speed. Wszystkie wersje wyposażone są w takielunek typu słup. Model Regular przeznaczony jest głównie do nauki żeglowania i rekreacji, natomiast Sport i Speed oferują rozszerzone możliwości regatowe i większą powierzchnię żagli [I.5, I.14]:

- 2020 Regular – wysokość masztu 7,11 m; posiada wyposażenie podstawowe i przeznaczony jest do nauki żeglowania i rekreacji; żagle – fok, grot,
- 2020 Sport – wysokość masztu 7,11 m; posiada dodatkowe żagle – spinaker symetryczny, spinaker asymetryczny wraz z oprzyrządowaniem; przeznaczony jest do celów sportowych,
- 2020 Speed – wysokość masztu 7,80 m; posiada większą powierzchnię ożaglowania oraz dodatkowe żagle – spinaker symetryczny i spinaker asymetryczny wraz z oprzyrządowaniem; przeznaczony jest do celów sportowych.

Do weryfikacji modelu oceny cyrkularności przyjęto wersję Regular Jachtu 2020, która charakteryzuje się podstawowym wyposażeniem i standardowym ożaglowaniem (grot i fok). Jacht posiada cechy konstrukcyjne i użytkowe, które są typowe dla znacznej części współczesnych jachtów komercyjnych tej klasy przeznaczonych do wykorzystania w celach rekreacyjnych i szkoleniowych, w szczególności na wodach śródlądowych i przybrzeżnych.

5.2. Ocena cyrkularności wybranej konstrukcji jachtowej

5.2.1. Inwentaryzacja danych

Zgodnie z informacjami przedstawionymi w rozdziale 5.1.2, jako obiekt badawczy służący do weryfikacji opracowanej metody oceny cyrkularności wybrano jacht 2020. Jego charakterystykę techniczną przedstawiono w rozdziale 5.1.3.

W ramach prac nad inwentaryzacją danych do obliczeń wskaźników cyrkularności konieczne było oparcie się na szczegółowej dokumentacji technicznej. Analiza rysunków złożeniowych i wykonawczych jachtu 2020 pozwoliła na identyfikację jego elementów składowych oraz określenie ilości i rodzaju materiałów zużywanych w procesie produkcji tych elementów. W niektórych przypadkach konieczne okazało się ponadto dokonanie obserwacji samego procesu produkcyjnego i dokonanie pomiarów masy elementów jachtu. Wynikało to z faktu, że dokumentacja techniczna nie zawierała wszystkich

niezbędnych do obliczeń danych. Podczas analizy procesu produkcyjnego odbywającego się w halach spółki ProAir Sp. z o.o. kluczowe okazały się konsultacje z zespołem inżynierów zaangażowanych w opracowanie i rozwój jachtu 2020. Ostatecznie, zebrane dane o ilości i rodzaju materiałów, z których wykonane są poszczególne elementy jachtu zestawiono w formie tabelarycznej (tab. 5.2).

Tabela 5.2. Materiały zastosowane w budowie jachtu 2020

Komponent	Masa [kg]	Materiał	Masa [kg]
Kadłub	250,00	Włókno szklane	100,00
		Żywica	110,00
		Żelkot	20,00
		Klej żywiczny	15,00
		Blacha Al	5,00
Miecz/balast	132,00	Stal węglowa	60,00
		Żeliwo – śrut żeliwny	50,00
		Włókno szklane	5,00
		Żywica	15,00
		Szpachlówka	2,00
Omasztowanie	15,50	Aluminium	15,00
		Mosiądz	0,50
Olinowanie	10,00	Lina stalowa nierdzewna	3,50
		Dyneema	4,00
		Bawełna	1,00
		Poliester	1,50
Ożaglowanie	7,00	Poliester	7,00
Osprzęt	10,70	Stal nierdzewna	5,00
		Aluminium anodowane	0,50
		PA	3,50
		Nylon	1,00
		Mosiądz	0,50
		Silikon	0,20

Źródło: Opracowanie własne

Po zebraniu danych materiałowych postanowiono zidentyfikować założenia projektowe, jakie przyświecały twórcom jachtu 2020. Aby tego dokonać, skonstruowano kwestionariusz (załącznik 3), o którego wypełnienie poproszono 5 członków zespołu zaangażowanego w tworzenie i rozwój jachtu 2020, w tym głównego konstruktora Eugeniusza Gintera. W kwestionariuszu poruszono zagadnienia dotyczące problematyki GOZ (np. zakładana intensywność eksploatacji, trwałość, scenariusze dot. napraw i zagospodarowania elementów jachtu) przy czym przyjęto, że osoby wypełniające formularz mają udzielać jedynie odpowiedzi ilościowych, a nie jakościowych. Po jego wypełnieniu przez członków zespołu (każdego z nich w sposób indywidualny)

zorganizowano spotkanie, gdzie w ramach dyskusji uzgodniono stanowiska co do poszczególnych kwestii poruszonych w badaniu. W ten sposób zidentyfikowano założenia, jakie przyświecały twórcom jachtu 2020.

Dokonując analizy informacji pozyskanych od twórców jachtu 2020 należy pamiętać, że ich intencją nie było opracowanie jachtu, który będzie zgodny z założeniami koncepcji GOZ. Z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym w kontekście jachtu 2020 wszyscy członkowie zespołu zetknęli się po raz pierwszy na etapie wypełnienia formularza i uzgadniania stanowisk w otwartej dyskusji. Pozyskane od nich informacje zastosowane w badaniu cyrkularności jachtu nie stanowią zatem podstawy do oceny efektów pracy projektantów i stwierdzenia na ile odzwierciedlili oni założenia koncepcji GOZ. Mogą one natomiast z powodzeniem posłużyć do oceny samej jednostki pływającej jako obiektu technicznego.

Zebrane dane dotyczące założeń projektowych jachtu 2020, istotnych z perspektywy opracowanego w rozprawie modelu oceny cyrkularności, przedstawiono w tab. 5.3.

Tab. 5.3. Wybrane założenia projektowe jachtu 2020

Założenia projektowe	Komponenty					
	kadłub	miec	omasztowanie	olinowanie	ożaglowanie	osprzęt
Założona intensywność użytkowania w ciągu roku [miesiące]	6	6	6	6	6	6
Redukcja masy komponentów jachtu w trakcie procesu projektowego [kg]	30	0	0	0	0	0
Założona trwałość [lata]	15	15	15	5	5	8
Prognozowane wydłużenie trwałości przez stosowanie napraw [lata]	5	5	0	0	3	0
Prognozowany czas eksploatacji komponentów pochodzących z używanego jachtu [lata]	7	7	5	0	0	5
Prognozowane wydłużenie trwałości przez zastosowanie remanufacturingu [lata]	10	10	5	0	0	0
Prognozowany czas zastosowania komponentu jachtu do pełnienia innej funkcji [lata]	5	5	10	5	2	5

Pozostałe dane przeznaczone do zastosowania w obliczeniach wskaźników cyrkularności jachtu pochodzą z zaproponowanych w rozdziale 4.4 klasyfikacji:

- uciążliwości środowiskowej,
- podatności recyklingowej,
- podatności do utylizacji termicznej.

Informacje na ich temat postanowiono zaprezentować w formie syntetycznej odpowiednio przy każdym rozpatrywanym wskaźniku cyrkularności w kolejnym rozdziale (5.2.2) rozprawy.

5.2.2. Obliczenia wskaźników cyrkularności

W oparciu o zależności zaprezentowane w rozdziale 4.2 rozprawy, w niniejszym rozdziale dokonano obliczeń poszczególnych wskaźników, które kształtują opracowany model oceny cyrkularności jachtu. Oparto się przy tym na danych dotyczących konstrukcji jachtu 2020 zebranych w rozdziale 5.2.1 i wartościach parametrów przedstawionych w klasyfikacjach zawartych w rozdziale 4.4.

Wskaźnik intensywności użytkowania jachtu

W pierwszej kolejności dokonano obliczeń wskaźnika intensywności użytkowania jachtu. Zgodnie z założeniami projektowymi jacht miał być użytkowany przeciętnie przez 6 miesięcy w roku (od maja do października). W związku z tym wskaźnik W_T przyjął wartości przedstawione w zgodne z poniższymi obliczeniami (5.1).

$$W_T = \frac{t}{T} = \frac{6}{12} = 0,5 \quad (5.1)$$

Wartość wskaźnika $W_T = 0,5$ jest konsekwencją użytkowania jachtu przez pół roku, co jest typowe dla warunków żeglugi śródlądowej w Polsce. Jeśli jacht byłby użytkowany w strefie klimatycznej, która umożliwiałaby żeglowanie przez więcej niż sześć miesięcy w ciągu roku, wartość wskaźnika byłaby odpowiednio wyższa. Byłaby to sytuacja korzystna z perspektywy założeń koncepcji GOZ.

Wskaźnik zastosowania materiałów pierwotnych

Zgodnie z informacjami przedstawionymi w tabeli 5.2 w konstrukcji jachtu 2020 zastosowano 18 różnych materiałów pochodzących wyłącznie ze źródeł pierwotnych. Informacje o masie każdego z nich zawarto w poniższej tabeli 5.4. Suma mas poszczególnych materiałów wynosi 425,2 kg i odpowiada całkowitej masie jachtu (m_c).

Tab. 5.4. Wartości masy materiałów użytych w konstrukcji jachtu 2020 W_{RM}

Lp.	Materiały pierwotne zastosowane w jachcie	m_{pi} [kg]
1	Włókno szklane (CRFP)	105
2	Żywica	125
3	Żelkot	20
4	Klej żywiczny	15
5	Aluminium	20
6	Stal węglowa	60
7	Żeliwo	50
8	Mosiądz	1

9	PE (dynnema)	4
10	Bawełna	1
11	PS (poliester)	8,5
12	PA (poliamid)	3,5
13	Nylon	1
14	Silikon	0,2
15	Szpachlówka	2
16	Stal nierdzewna	5
17	Lina stalowa nierdzewna	3,5
18	Aluminium anodowane	0,5
Łączna masa materiałów pierwotnych ($\sum m_{pi}$)		425,2

$$W_{RM} = \frac{\sum_{i=1}^p m_{pi}}{m_c} = \frac{425,2}{425,2} = 1 \quad (5.2)$$

Wartość wskaźnika zastosowania materiałów pierwotnych $W_{RM} = 1$ jest konsekwencją oparcia się w konstrukcji jachtu wyłącznie na tych materiałach. W budowie jednostki nie użyto żadnych materiałów pochodzących z jakiegokolwiek formy recyklingu. Jest to sytuacja skrajnie niekorzystna z perspektywy założeń koncepcji GOZ. Odzwierciedla ona jednak typowe dla konstrukcji małych jednostek śródlądowych ograniczenie. W konstrukcji żadnej z jednostek rozpatrywanych do analizy na etapie ich wyboru (rozdział 5.1.2) nie zastosowano materiałów wtórnych. W sytuacji, gdyby materiały wtórne zostały zastosowane w konstrukcji jachtu wartość wskaźnika W_{RM} byłaby mniejsza niż 1, a tym bardziej zbliżałaby się do zera, im mniejszy byłby udział materiałów pierwotnych w całkowitej masie jachtu. Odzwierciedla to fakt, że wskaźnik W_{RM} jest minimentem.

Wskaźnik uciążliwości środowiskowej materiałów zastosowanych w budowie jachtu

Przystępując do obliczenia wskaźnika uciążliwości środowiskowej materiałów zastosowanych w jachcie w pierwszej kolejności każdemu z użytych materiałów przypisano odpowiednią klasę uciążliwości kierując się w tym zakresie klasyfikacją przedstawioną w rozdziale 4.4.2. Wynik tego działania przedstawiono w tabeli 5.5. W tabeli zawarto również informację o iloczynie wartości masy materiału i klasy jego uciążliwości środowiskowej, co stanowiło podstawę wyznaczenia wartości wskaźnika W_E (obliczenie 5.3).

Tab. 5.5. Parametry ujęte w obliczeniach wskaźnika W_E

Lp.	Materiały podlegające klasyfikacji	m_i [kg]	k_i [kg]	$k_i m_i$
1	Włókno szklane (CRFP)	105	6	630
2	Żywica	125	4	500
3	Żelkot	20	4	80
4	Klej żywiczny	15	5	75
5	Aluminium	20	5	100

6	Stal węglowa	60	3	180
7	Żeliwo	50	3	150
8	Mosiądz	1	6	6
9	PE (dynnema)	4	4	16
10	Bawełna	1	5	5
11	PS (poliester)	8,5	4	34
12	PA (poliamid)	3,5	4	14
13	Nylon	1	4	4
14	Silikon	0,2	4	0,8
15	Szpachlówka	2	4	8
16	Stal nierdzewna	5	3	15
17	Lina stalowa nierdzewna	3,5	3	10,5
18	Aluminium anodowane	0,5	4	2
Suma uciążliwości środowiskowych materiałów ($\sum k_i m_i$)				1830,3

$$W_E = \frac{\sum_{i=1}^r k_i m_i}{10 m_c} = \frac{1830,3}{4252} = 0,43 \quad (5.3)$$

Wartość wskaźnika W_E odzwierciedla wpływ materiałów zastosowanych w konstrukcji jachtu na środowisko. W przypadku jachtu 2020 dominujący wpływ na poziom niekorzystnego oddziaływania środowiskowego wywiera zastosowanie włókna szklanego i żywicy. Są to materiały, których udział masowy w konstrukcji jachtu jest największy, a włókno szklane zaliczono do 6 klasy materiałów pod względem uciążliwości środowiskowej. Oba te materiały (włókno szklane i żywica) mają ponad 60% wpływu na całkowitą wartość wskaźnika uciążliwości środowiskowej materiałów zastosowanych w jachcie 2020.

Można zatem stwierdzić, że korzystne byłoby zaproponowanie zmian ukierunkowanych na zastosowanie innych rozwiązań konstrukcyjnych niż budowa kadłuba z laminatu. Mniejsza ilość materiałów, jak i ich niższy poziom uciążliwości środowiskowej przyczyniłyby się do poprawy (obniżenia) wartości wskaźnika W_E , zgodnie z tym, że wskaźnik jest minimentem. Mimo, że istnieją prototypowe konstrukcje małych jachtów śródlądowych wykonanych z innych materiałów (np. z aluminium) to jednak faktem jest duże rozpowszechnienie technologii opartej o włókna szklane i żywice. Wynika to przede wszystkim z niższych kosztów w sytuacji, gdy producent zakłada produkcję seryjną jednostek.

Wskaźnik minimalizacji masy jachtu

W celu obliczenia wartości wskaźnika minimalizacji jachtu 2020 posłużono się tabelarycznym zestawieniem mas poszczególnych materiałów pogrupowanych w ramach komponentów jachtu (tab. 5.2) oraz informacjami dotyczącymi redukcji masy jachtu w procesie jego kształtowania – od pierwszej wersji projektu technicznego do powstania egzemplarzy produkcyjnych (tab. 5.3). Dane niezbędne do wyznaczenia wartości wskaźnika zestawiono w tabeli 5.6. Okazało się, że masa jachtu 2020 została zredukowana w sposób istotny w wyniku działań optymalizujących kadłub jachtu – od

początkowej wartości masy kadłuba $m_p = 280$ kg do wartości $m_r = 250$ kg odzwierciedlającej masę kadłuba jachtu w wersji produkcyjnej. Masy pozostałych komponentów jachtu 2020 nie udało się zredukować.

Tab. 5.6. Parametry ujęte w obliczeniach wskaźnika W_m

Lp.	Komponenty podlegający redukcji masy	m_{pki} [kg]	m_{rki} [kg]
1	Kadłub	280	250
2	Miecz	132	132
3	Omasztowanie	15,5	15,5
4	Olinowanie	10	10
5	Ożaglowanie	7	7
6	Osprzęt	10,7	10,7
Łączna masa komponentów przed redukcją ($\sum m_{pki}$)		455,2	
Łączna masa komponentów po redukcji ($\sum m_{rki}$)			425,2

$$W_m = \frac{\sum_{i=1}^k (m_{pki} - m_{rki})}{m_p} = \frac{30}{455,2} = 0,066 \quad (5.4)$$

Wartość wskaźnika $W_m = 0,066$ wskazuje skalę efektów działań optymalizujących konstrukcję jachtu 2020 pod względem masy jego komponentów. Można tu zatem mówić o redukcji masy na poziomie 6,6%. Nie mając danych o efektach prac nad optymalizacją masy innych jednostek pływających trudno jest oceniać ten rezultat. Z perspektywy założeń koncepcji GOZ pożądana byłaby jak największa wartość wskaźnika. Należy jednak pamiętać, że w odróżnieniu od wielu innych parametrów będących maksymentami, w przypadku wskaźnika W_m występują pewne ograniczenia. Należy brać bowiem pod uwagę to, który komponent optymalizuje się pod względem jego masy. Uwzględniając perspektywę zachowania jachtu na wodzie, zasadne jest obniżanie masy szczególnie tych komponentów, których środek ciężkości umieszczony jest jak najwyżej.

Wskaźnik zastosowania komponentów recykulowanych

Wskaźnik zastosowania komponentów recykulowanych wskazuje na to, jaki jest udział masy tej kategorii komponentów w ogólnej masie jachtu. Dane będące podstawą do wyznaczenia wielkości wskaźnika zestawiono w tabeli 5.7. Pochodzą one z tabeli komponentów jachtu i masy ich składowych (tab. 5.2) oraz z informacji pozyskanych od członków zespołu projektującego jacht 2020 (załącznik 3). Wskazali oni te komponenty konstrukcji, które mogą pochodzić z innych, używanych wcześniej jednostek pływających.

Tab. 5.7. Parametry ujęte w obliczeniach wskaźnika W_U

Lp.	Komponenty recykulowane	m_{ki} [kg]
1	Omasztowanie	15,5
2	Olinowanie	10

3	Osprzęt	10,7
Łączna masa komponentów recykulowanych ($\sum m_{ki}$)		36,2

$$W_U = \frac{\sum_{i=1}^k m_{ki}}{m_c} = \frac{36,2}{425,2} = 0,085 \quad (5.5)$$

Wartość wskaźnika $W_U = 0,085$ mówi o tym, że udział masy komponentów mogących pochodzić z innych jednostek pływających w masie całkowitej jachtu 2020 wynosi 8,5%. Jak wskazali projektanci jachtu, jedynie 3 jego komponenty mogą być komponentami używanymi. Nie jest jednak istotna jedynie liczba tych komponentów, ale również ich masa. Sumaryczna masa wspomnianych (potencjalnie używanych) komponentów jachtu 2020 wynosi niewiele ponad 36 kg. Zespół projektujący jacht 2020 jednoznacznie odrzucił możliwość zastosowania w sposób systemowy innych używanych komponentów, których masa jest zdecydowanie większa, np. kadłuba lub balastu. Argumentacja za odrzuceniem takiej możliwości związana jest przede wszystkim z kwestiami bezpieczeństwa jednostki.

Wskaźnik potencjału do ponownego użycia komponentów jachtu

Wartość wskaźnika potencjału do ponownego użycia komponentów jachtu (W_{Reu}) wyznaczono w sposób analogiczny do wskaźnika zastosowania komponentów recykulowanych. Mówi ono o tym, jaki jest stosunek masy komponentów, które mogą być użyte w innych jednostkach pływających (po zakończeniu eksploatacji w „pierwotnym” jachcie 2020) do masy całkowitej jachtu. Dane do wyznaczenia wielkości wskaźnika zawarto w tabeli 5.8. Wynikają one z zestawu danych zawartych w tab. 5.2 oraz z informacji pozyskanych od członków zespołu projektującego jacht 2020 (tab. 5.3 i załącznik 3).

Tab. 5.8. Parametry ujęte w obliczeniach wskaźnika W_{Reu}

Lp.	Komponenty z potencjałem do ponownego użycia	m_{ki} [kg]
1	Miecz	132
2	Omasztowanie	15,5
3	Olinowanie	10
4	Osprzęt	10,7
Łączna masa komponentów do ponownego użycia w jachcie ($\sum m_{ki}$)		168,2

$$W_{Reu} = \frac{\sum_{i=1}^k m_{ki}}{m_c} = \frac{168,2}{425,2} = 0,396 \quad (5.6)$$

Jak wynika z tabeli 5.8, 4 komponenty w opinii członków zespołu projektującego jacht 2020 mają potencjał, by być ponownie zastosowanymi w innych jednostkach pływających po zakończeniu eksploatacji. Są to miecz, omasztowanie, olinowanie i osprzęt. Ich łączna masa to ponad 168 kg, co stanowi blisko 40% udział w całkowitej

masie jachtu 2020. Stąd też wartość wskaźnika $W_{Reu} = 0,4$. Z perspektywy założeń koncepcji GOZ, korzystne byłoby zapewnienie możliwości powtórnego wykorzystania jak największej liczby komponentów jachtu, a szczególnie tych, które wymagają zastosowania dużej ilości materiału. Nie zawsze jest to jednak możliwe. Możliwości powtórnego zastosowania kadłuba do budowy nowych jednostek podobnej klasy w opinii projektantów projektujących jacht 2020 są ograniczone ze względu na utratę jego właściwości wytrzymałościowych. Jest to typowe dla konstrukcji laminatowych. Budowa kadłuba z innego materiału (np. z aluminium) mogłaby pozwolić na eliminację tego ograniczenia.

Wskaźnik naprawialności jachtu

Kierując się informacjami zawartymi w tabeli 5.3 zidentyfikowano komponenty jachtu 2020, które są podatne do napraw, uwzględniając przy tym prognozowany przez projektantów czas ich eksploatacji. Dane te uzupełniono o okres, o który wydłuży się potencjalnie czas eksploatacji tych komponentów dzięki realizacji napraw. Zidentyfikowanym komponentom przypisano ponadto ich masy (na podstawie tabeli 5.2). W ten sposób zgromadzono wszystkie informacje niezbędne do obliczenia wartości wskaźnika naprawialności jachtu W_{Rep} .

Tab. 5.9. Parametry ujęte w obliczeniach wskaźnika W_{Rep}

Lp.	Komponenty podlegające naprawom	m_{ki} [kg]	T_{pi} [lata]	T_{repi} [kg]
1	Kadłub	250	15	5
2	Miecz	132	15	5
3	Ożaglowanie	7	5	3
Łączna masa komponentów naprawialnych ($\sum m_{ki}$)		389		

$$W_{Rep} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{m_{ki}}{m_c} \times \left(1 - \frac{T_{pi}}{T_{pi} + T_{repi}} \right) \right) = \left(\frac{250}{425,2} \times \left(1 - \frac{15}{15+5} \right) \right) + \left(\frac{132}{425,2} \times \left(1 - \frac{15}{15+5} \right) \right) + \left(\frac{7}{425,2} \times \left(1 - \frac{5}{5+3} \right) \right) = 0,231 \quad (5.7)$$

Jak wynika z tabeli 5.9 czas, o który dzięki naprawom można wydłużyć okres eksploatacji dwóch komponentów o znaczącej masie (kadłuba i balastu) to 1/3 zakładanej przez projektantów trwałości. Nieco lepiej wypada pod tym względem ożaglowanie, którego planowany średni okres eksploatacji (5 lat) może być wydłużony o 3 lata. Trwałości pozostałych komponentów jachtu w opinii projektantów nie da się przedłużyć stosując naprawy, przy założeniu zachowania wymaganych parametrów wytrzymałościowych, które rzutują na bezpieczeństwo eksploatacji.

Wartość wskaźnika $W_{Rep} = 0,23$ trudno jest ocenić ze względu na brak porównywalnych danych, które charakteryzowałyby inne, szczególnie podobnej kategorii obiekty techniczne. Z pewnością jednak zastosowanie komponentów z innych materiałów, które cechowałaby większa podatność do napraw, poprawiłoby otrzymaną wartość wskaźnika. Przykładem tego mógłby być kadłub wykonany z aluminium, gdzie

w przypadku uszkodzeń mechanicznych możliwe jest wycięcie fragmentu kadłuba (zazwyczaj blachy aluminiowej) i spawanie nowego.

Wskaźnik potencjału do remanufacturingu

Wskaźnik potencjału do remanufacturingu wskazuje na to, na ile elementy jachtu są zdadne do realizacji procesów, które przez odbudowę wydłużają cykl życia jednostki pływającej umożliwiając jej powtórne wykorzystanie (po zakończeniu pierwotnej eksploatacji) do tych samych celów i z zachowaniem pełnego spektrum funkcjonalności. Dane będące podstawą do wyznaczenia wielkości wskaźnika zestawiono w tabeli 5.10. Pochodzą one z tabeli komponentów jachtu i masy ich składowych (tab. 5.2) oraz z informacji pozyskanych od członków zespołu projektującego jacht 2020 (tab. 5.3 i załącznik 3). Wskazali oni te komponenty konstrukcji, które są zdadne do remanufacturingu i zaprognozowali ich trwałość w efekcie tego procesu.

Tab. 5.10. Parametry ujęte w obliczeniach wskaźnika W_{Rem}

Lp.	Komponenty zdadne do remanufacturingu	m_{ki} [kg]	T_{pi} [lata]	T_{remi} [kg]
1	Kadłub	250	15	10
2	Miecz	132	15	10
3	Omasztowanie	15,5	15	5
Łączna masa komponentów mogących podlegać remanufacturingowi ($\sum m_{ki}$)		397,5		

$$W_{Rem} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{m_{ki}}{m_c} \times \left(1 - \frac{T_{pi}}{T_{pi} + T_{Remi}} \right) \right) = \left(\frac{250}{425,2} \times \left(1 - \frac{15}{15+1} \right) \right) + \left(\frac{132}{425,2} \times \left(1 - \frac{15}{15+10} \right) \right) + \left(\frac{15,5}{425,2} \times \left(1 - \frac{15}{15+5} \right) \right) = 0,368 \quad (5.8)$$

Na wartość wskaźnika $W_{Rem} = 0,37$, którą otrzymano dla jachtu 2020 wpływ mają kadłub, miecz i omasztowanie. W ocenie projektantów jachtu, rezultatem odbudowy kadłuba i miecza może być wydłużenie ich trwałości o 2/3, przy czym odbyłoby się to bez straty dla walorów wytrzymałościowych konstrukcji i cech funkcjonalnych. Możliwości remanufacturingu omasztowania są już bardziej ograniczone, a prognozowany efekt w zakresie trwałości to jej wydłużenie o 1/3.

Podobnie, jak w przypadku innych wskaźników trudno jest ocenić w sposób obiektywny wartość wskaźnika potencjału do remanufacturingu dla jachtu 2020. Nie ma bowiem porównywalnych danych o innych obiektach technicznych, szczególnie w zakresie jednostek pływających. Na podstawie otrzymanego wyniku można jedynie wysunąć wniosek, że korzystne jest, iż dominujące (pod względem masy) komponenty jachtu 2020 są zdadne do odbudowy. Do poprawy wskaźnika przyczyniłoby się z pewnością wydłużenie okresu trwałości komponentu, będące skutkiem przeprowadzonego remanufacturingu.

Wskaźnik potencjału do pełnienia innej funkcji (repurpose) przy zachowaniu sprawności użytkowej

Wskaźnik potencjału do pełnienia innej funkcji (W_{Pur}) odzwierciedlający założenia strategii GOZ zwanej „Repurpose” może być odniesiony zarówno do całego obiektu technicznego, jak i jego komponentów. W przypadku jachtu 2020 trudno sobie wyobrazić zastosowanie całego jachtu do innych celów niż żeglowanie. Możliwe jest jednak zastosowanie do innych celów komponentów jachtu.

Dane niezbędne do wyznaczenia wskaźnika W_{Pur} zestawiono w tabeli 5.11. Dla komponentów jachtu 2020, które mają potencjał do ponownego użycia w innym przeznaczeniu wyszczególniono masę, przewidywaną trwałość oraz prognozowany okres eksploatacji w innym zastosowaniu. Dane te pochodzą z tabel 5.2 (zestawienie komponentów jachtu i mas użytych w nich materiałów) oraz 5.3 (założenia projektowe przyjęte przez projektantów).

Tab. 5.11. Parametry ujęte w obliczeniach wskaźnika W_{Pur}

Lp.	Komponenty z potencjałem do zastosowania w innym celu niż w jachcie	m_{ki} [kg]	T_{pi} [lata]	T_{puri} [kg]
1	Kadłub	250	15	5
2	Miecz	132	15	5
3	Omasztowanie	15,5	15	10
4	Olinowanie	10	5	5
5	Ożaglowanie	7	5	2
6	Osprzęt	10,7	8	5
Łączna masa komponentów, które mogą podlegać procesowi repurpose ($\sum m_{ki}$)		425,2		

$$\begin{aligned}
 W_{\text{Pur}} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{m_{ki}}{m_c} \times \left(1 - \frac{T_{pi}}{T_{pi} + T_{puri}} \right) \right) &= \left(\frac{250}{425,2} \times \left(1 - \frac{15}{15+5} \right) \right) + \\
 \left(\frac{132}{425,2} \times \left(1 - \frac{15}{15+5} \right) \right) &+ \left(\frac{15,5}{425,2} \times \left(1 - \frac{15}{15+1} \right) \right) + \left(\frac{10}{425,2} \times \left(1 - \frac{5}{5+5} \right) \right) + \\
 \left(\frac{7}{425,2} \times \left(1 - \frac{5}{5+2} \right) \right) &+ \left(\frac{10,7}{425,2} \times \left(1 - \frac{8}{8+5} \right) \right) = 0,265
 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Wartość wskaźnika dla jachtu 2020 wynosi $W_{\text{Pur}} = 0,27$. Na jego wielkość wpływają: masa komponentów podlegających ponownemu wykorzystaniu w ramach koncepcji repurpose oraz okres prognozowanej trwałości tych komponentów w nowym zastosowaniu. Według stanowiska projektantów wszystkie komponenty zastosowane na jachcie 2020 mają potencjał do powtórnego użycia (po eksploatacji na jachcie) w innym przeznaczeniu. Zróżnicowany jest jednak prognozowany okres eksploatacji tych komponentów. To właśnie ten parametr wpływa w istotny sposób na końcową wartość wskaźnika. Dla dwóch komponentów o największej masie (kadłuba i miecza), których pierwotna trwałość na jachcie prognozowana jest na 15 lat, projektanci przewidują, że w

nowym zastosowaniu będą one mogły być używane przez 5 lat, a więc o 1/3 wydłuży się cykl ich życia.

Warto tu zaznaczyć, że projektanci jachtu 2020 wskazują szereg potencjalnych zastosowań zużytych komponentów jachtu 2020. Wśród nich występują przykładowo takie zastosowania jak:

- wanny przemysłowe, elementy małej architektury ogrodowej, oczka wodne (kadłuby),
- akumulatory ciepła w kominkach (miecz),
- elementy ogrodzenia, barierki, słupy ogłoszeniowe (maszty),
- zabezpieczenia ładunków w logistyce (olinowanie),
- osłony przeciwsłoneczne, plandeki techniczne (ożaglowanie),
- elementy infrastruktury portowej, np. wyciągarki, boje cumownicze, elementy montażowe (osprzęt).

Wskaźnik zdolności do recyklingu

Dane do wyznaczenia wskaźnika zdolności do recyklingu zebrano posilując się informacjami zawartymi w tabeli 5.2 (materiały użyte w budowie jachtu 2020) oraz w klasyfikacji komponentów jachtowych odzwierciedlającej ich podatność recyklingową (tab. 4.7). W ten sposób dla każdego z komponentów jachtu 2020 określono jego masę i przypisano mu numer jednej z 5 klas podatności do recyklingu. Wyniki tego działania przedstawiono w tabeli 5.12, a ich zastosowanie w obliczeniach odzwierciedla zależność 5.10.

Tab. 5.12. Parametry ujęte w obliczeniach wskaźnika W_{Rec}

Lp.	Komponenty zdolne do recyklingu	m_i	k_i	$k_i m_i$
1	Kadłub	250	2	500
2	Miecz	132	2	264
3	Omasztowanie	15,5	5	77,5
4	Olinowanie	10	4	40
5	Ożaglowanie	7	3	21
6	Osprzęt	10,7	5	53,5

$$W_{Rec} = \sum_{i=1}^r \frac{k_i m_i}{5 m_c} = \frac{956}{5 \times 425,2} = 0,45 \quad (5.10)$$

Wartość wskaźnika zdolności do recyklingu jachtu 2020 wynosi $W_{Rec} = 0,45$. Istotny wpływ na tę wartość wywiera z pewnością technologia wykonania kadłuba i miecza. Są to komponenty, których udział w masie całego jachtu jest największy (ok. 90%), a jednocześnie technologia ich wykonania spowodowała sklasyfikowanie ich przez ekspertów jako trudne do recyklingu (2 w skali od 1 do 5). Można zatem stwierdzić, że chcąc poprawić wizerunek jachtu 2020 pod względem zapewnienia mu wysokiego poziomu zdolności do recyklingu, należałoby rozważyć modyfikację sposobu wykonania

tych właśnie elementów jachtu. Okazuje się, że po raz kolejny w rozważaniach wartości wskaźników cyrkularności jachtu, korzystne byłoby zastąpienie kadłuba wykonanego z laminatu kadłubem aluminiowym. Klasa zdatności do recyklingu dla kadłuba wykonanego ze stopów aluminium wynosi bowiem 5 (na podstawie tabeli 4.7).

Wskaźnik zdatności do utylizacji termicznej

Wskaźnik zdatności do spalania (W_{Inc}) odzwierciedla możliwości zagospodarowania jachtu w procesie spalania jego elementów składowych. Do jego obliczenia (zgodnie z treścią rozdziału 4.2.12) konieczna jest dekompozycja jachtu na materiały składowe, które zostały użyte w jego budowie. Stąd też przystępując do obliczeń wartości wskaźnika W_{Inc} zestawiono wszystkie materiały zastosowane w jachcie przypisując im odpowiednie masy (na podstawie tab. 5.2) a następnie przypisano im klasy wskazujące na poziom zdatności do utylizacji termicznej (klasy określono na podstawie klasyfikacji z tabeli 4.8). Rezultaty przeprowadzonych działań inwentaryzujących zebrane dane zaprezentowano w tabeli 5.13, zaś ich zastosowanie w obliczeniach odzwierciedlono w zależności 5.11.

Tab. 5.13. Parametry ujęte w obliczeniach wskaźnika W_{Inc}

Lp.	Materiały użyte w jachcie	m_i	k_i	$k_i m_i$
1	Włókno szklane (CRFP)	105	3	315
2	Żywica	125	3	375
3	Żelkot	20	3	60
4	Klej żywiczny	15	3	45
5	Aluminium	20	1	20
6	Stal węglowa	60	1	60
7	Żeliwo	50	1	50
8	Mosiądz	1	1	1
9	PE (dynnema)	4	5	20
10	Bawełna	1	2	2
11	PS (poliester)	8,5	3	25,5
12	PA (poliamid)	3,5	4	14
13	Nylon	1	4	4
14	Silikon	0,2	3	0,6
15	Szpachlówka	2	3	6
16	Stal nierdzewna	5	1	5
17	Lina stalowa nierdzewna	3,5	1	3,5
18	Aluminium anodowane	0,5	1	0,5

$$W_{Inc} = \sum_{i=1}^r \frac{k_i m_i}{5 m_c} = \frac{1007,1}{5 \times 425,2} = \frac{1007,1}{2126} = 0,474 \quad (5.11)$$

Wartość wskaźnika zdatności do utylizacji termicznej jachtu 2020 wniosła $W_{Inc} = 0,47$. Zauważyć należy, że w odróżnieniu od wskaźnika zdatności do recyklingu, wyższe numery klas nadano tym materiałom, które dominują pod względem udziału w masie

całego jachtu. Są to przede wszystkim materiały użyte do budowy kadłuba i balastu jednostki (przede wszystkim włókna szklane i żywice). Metale, które cechuje niska zdolność do utylizacji termicznej (klasa zdolności to 1) stanowią ok. 30% masy jednostki 2020.

Można z tego wysunąć wniosek, że większy udział masowy materiałów trudnych do recyklingu mechanicznego w konstrukcji jachtu 2020 (wpływający niekorzystnie na wartość wskaźnika W_{Rec}) jest korzystny z perspektywy oceny jachtu pod względem jego zdolności do utylizacji termicznej. Należy jednak pamiętać, że obu wymienionych tu sposobów zagospodarowania materiałów nie wolno traktować jako równorzędnych. Z perspektywy założeń koncepcji GOZ utylizacja termiczna jest traktowana jako ostateczny i najmniej korzystny wariant zagospodarowania „odpadów”. Z tego właśnie powodu w niniejszej pracy nadano różne wagi wskaźnikom odzwierciedlającym poszczególne aspekty oceny obiektów technicznych (w tym przypadku jachtów) pod względem ich zgodności z założeniami koncepcji GOZ. Analizie uwzględniającej wspomniane wagi poświęcono kolejny rozdział (5.2.3) rozprawy.

5.2.3. Sumaryczny wskaźnik cyrkularności

Wyniki obliczeń zaprezentowanych w rozdziale 5.2.2 stały się podstawą do wyznaczenia wartości sumarycznego wskaźnika cyrkularności (W_s) jachtu 2020, który w postaci jednej liczby odzwierciedla poziom zgodności jachtu z założeniami koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. W wyznaczaniu tego wskaźnika oparto się na założeniach metodycznych dotyczących modelu oceny cyrkularności, które zaprezentowano w rozdziale 4.3 rozprawy. Zaproponowany w tym modelu sumaryczny wskaźnik cyrkularności ujmuje wszystkie 11 analizowanych aspektów cyrkularności, które odzwierciedlono we wskaźnikach składowych – od wskaźnika intensywności użytkowania jachtu aż po wskaźnik zdolności do utylizacji termicznej.

Wartości wskaźników cyrkularności obliczonych w ramach rozdziału 5.2.2 zestawiono w tabeli 5.14. W tej tabeli wskazano również charakter każdego ze wskaźników (minimant lub maksymant), a następnie dokonano ich ujednolicenia tak, aby w przypadku każdego ze wskaźników wartości bliskie jedności (w przedziale od 0 do 1) wskazywały na wysoki poziom zgodności z założeniami koncepcji GOZ.

We wspomnianej tabeli zestawiono ponadto wartości współczynników wagowych, które wskazują na istotność poszczególnych aspektów GOZ w ogólnym obrazie cyrkularności obiektów technicznych, a w tym przypadku jachtów. Współczynniki wagowe wyznaczono na podstawie badań przeprowadzonych z udziałem ekspertów z dziedziny gospodarki o obiegu zamkniętym. Informacje na temat tych badań, które przeprowadzono z wykorzystaniem metody delfickiej zawarto w rozdziale 4.3 niniejszej rozprawy oraz w załączniku 1.

Tab.5.14. Zestawienie parametrów ujętych w obliczeniach sumarycznego wskaźnika W_s jachtu 2020

Lp.	Wskaźnik	Charakter wskaźnika	Wartość wskaźnika	Wartość wskaźnika po ujednoliceniu	Współczynnik wagowy
1	W_T	max	0,500	0,500	0,150
2	W_{RM}	min	1,000	0,000	0,100
3	W_E	min	0,430	0,570	0,150
4	W_m	max	0,066	0,066	0,050
5	W_U	max	0,085	0,085	0,050
6	W_{Reu}	max	0,396	0,396	0,100
7	W_{Rep}	max	0,231	0,231	0,100
8	W_{Rem}	max	0,368	0,368	0,100
9	W_{Pur}	max	0,265	0,265	0,050
10	W_{Rec}	max	0,450	0,450	0,100
11	W_{Inc}	max	0,474	0,474	0,050

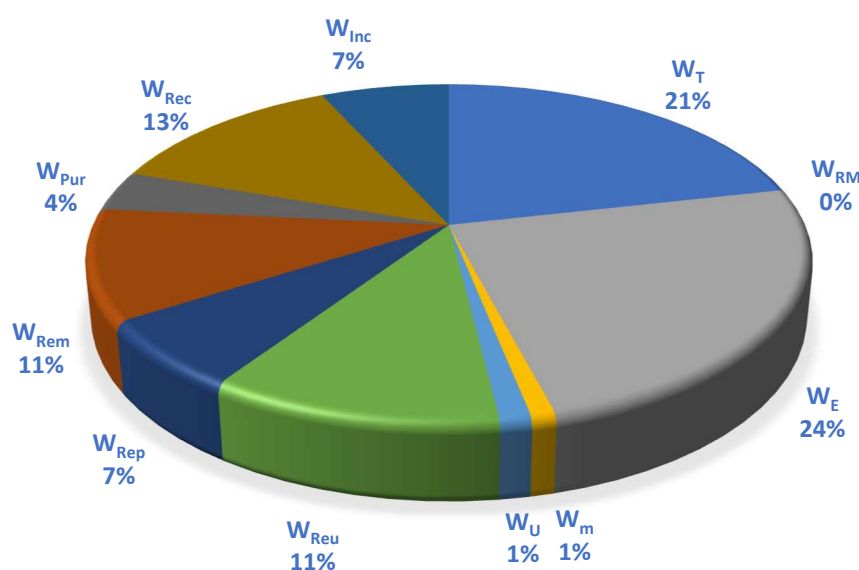
Oznaczenia poszczególnych wskaźników zastosowane w tabeli 5.14 mają takie samo znaczenie jak oznaczenia w rozdziałach 4.2, 4.3 i 5.2.2. Określają one odpowiednio: W_T – wskaźnik intensywności użytkowania, W_{RM} – wskaźnik zastosowania materiałów pierwotnych, W_E – uciążliwości środowiskowej, W_m – wskaźnik minimalizacji masy, W_U – wskaźnik zastosowania komponentów recykulowanych, W_{Reu} – wskaźnik potencjału do ponownego użycia, W_{Rep} – wskaźnik naprawialności, W_{Rem} – wskaźnik potencjału do remanufacturingu, W_{Pur} – wskaźnik potencjału do pełnienia innych funkcji, W_{Rec} – wskaźnik zdolności do recyklingu, W_{Inc} – wskaźnik zdolności do utylizacji termicznej. Ze względu na dużą liczbę wskaźników, informacji o ich znaczeniu postanowiono nie powtarzać w ciągu dalszym pracy, zarówno w legendzie do obliczeń, wykresów, jak i w opisach dotyczących interpretacji wyników.

Wielkości zaprezentowane w tabeli 5.14 posłużyły do obliczenia sumarycznego wskaźnika cyrkularności W_s . Ich zastosowanie w obliczeniach odzwierciedla poniższa zależność 5.12.

$$\begin{aligned}
 W_s &= 0,15 \times W_T + 0,1 \times (1 - W_{RM}) + 0,15 \times (1 - W_E) \\
 &+ 0,05 \times W_m + 0,05 \times W_U + 0,1 \times W_{Reu} + 0,1 \times W_{Rep} \\
 &+ 0,1 \times W_{Rem} + 0,05 \times W_{Pur} + 0,1 \times W_{Rec} \\
 &+ 0,05 \times W_{Inc} \\
 &= 0,15 \times 0,500 + 0,1 \times 0,00 + 0,15 \times 0,570 \\
 &+ 0,05 \times 0,066 + 0,05 \times 0,085 + 0,1 \times 0,396 \\
 &+ 0,1 \times 0,231 + 0,1 \times 0,368 + 0,05 \times 0,265 \\
 &+ 0,1 \times 0,450 + 0,05 \times 0,474 \\
 &= 0,075 + 0,00 + 0,085 + 0,003 + 0,004 + 0,040 \\
 &+ 0,023 + 0,037 + 0,013 + 0,045 + 0,024 = 0,349
 \end{aligned}
 \tag{5.12}$$

Wynik obliczeń wskaźnika cyrkularności jachtu 2020 to $W_s = 0,349$. Ze względu na dotychczasowy brak zastosowań opracowanego w rozprawie modelu oceny cyrkularności w odniesieniu do innych obiektów technicznych, nie można przesądzać o tym na ile jest to wynik korzystny lub niekorzystny. Oczywiście jest, że im bardziej otrzymany wynik byłby bliski jedności, tym bardziej byłoby uprawnione stwierdzenie, że jacht 2020 odpowiada założeniom koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym.

Postanowiono jednak dokonać oceny tego, na ile aspekty GOZ ujęte w modelu oceny cyrkularności wpływają na wartość sumarycznego wskaźnika. Pokazuje to wykres kołowy zaprezentowany na rys. 5.4.



Rys. 5.4. Wpływ poszczególnych wskaźników ujętych w modelu oceny cyrkularności jachtu 2020 na wartość sumarycznego wskaźnika W_s

Jak wynika z wykresu, wśród wskaźników cyrkularności znalazły się dwa (wskaźnik uciążliwości środowiskowej i wskaźnik intensywności użytkowania), których wpływ na wartość sumarycznego wskaźnika przekracza 20%. Mniejsze znaczenie pod tym względem (w granicach 10-20%) mają wskaźniki:

- zdolności do recyklingu – 13%,
- potencjału do ponownego użycia – 11%,
- potencjału do remanufacturingu – 11%.

Wpływ pozostałych wskaźników na wartość sumarycznego wskaźnika cyrkularności jest już znacznie mniejszy, gdyż nie przekracza 10 %. W tej grupie znalazły się kolejno wskaźniki:

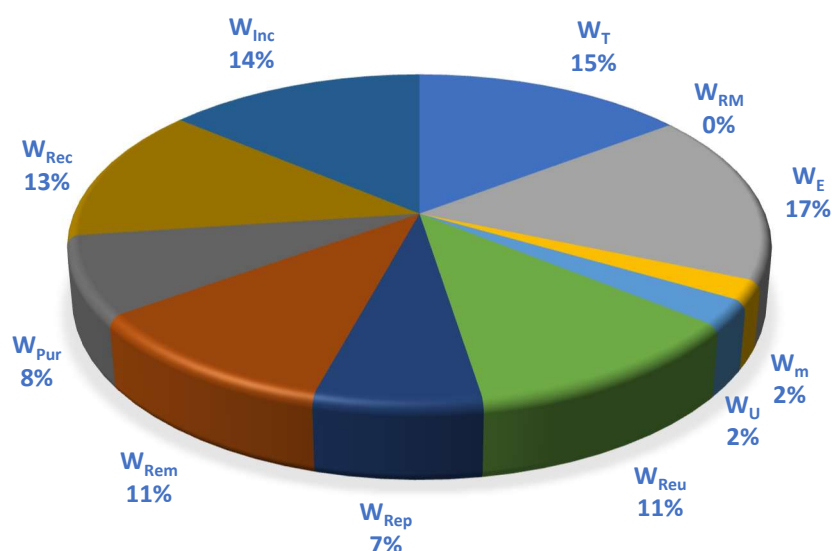
- naprawialności – 7%,
- zdolności do utylizacji termicznej – 7%,
- potencjału do pełnienia innych funkcji – 4%,
- minimalizacji masy jachtu – 1%,
- zastosowania komponentów recykulowanych – 1%,

- zastosowania materiałów pierwotnych – 0%.

Z przeprowadzonej analizy można wyciągnąć wniosek, że jacht 2020 w największym stopniu odpowiada założeniom koncepcji GOZ ze względu na dobór zastosowanych w nim materiałów pod względem ich uciążliwości środowiskowej. Na podobnym poziomie korzystny jest wpływ wskaźnika, który odzwierciedla założony poziom intensywności użytkowania jachtu. Zalet istotnych z perspektywy cyrkularności jachtu 2020 można też doszukiwać się w obszarach jego przystosowania do procesów recyklingu, do ponownego użycia i remanufacturingu.

Istotne znaczenie dla wpływu poszczególnych wskaźników na wartość sumarycznego wskaźnika cyrkularności miały nie tylko same wskaźniki jednostkowe, ale również wagi, które przypisano im w rezultacie badań, jakie przeprowadzono z udziałem ekspertów z dziedziny gospodarki o obiegu zamkniętym. Eksperti nadali poszczególnym wskaźnikom różniące się wagi – od 0,05 do 0,15. Wagi nadane przez ekspertów odzwierciedlały istotność poszczególnych aspektów GOZ w ogólnym „obrazie” cyrkularności obiektów technicznych branży jachtowej.

W związku z powyższym postanowiono przeanalizować, jakie są proporcje pomiędzy wartościami poszczególnych wskaźników cyrkularności. Aby ich wartości były porównywalne, konieczne okazało się posłużenie wartościami wskaźników po ich ujednoliceniu (tab. 5.14), czyli po sprowadzeniu ich wartości do postaci maksymentu. Rezultaty uzyskane w takiej analizie prezentuje rys. 5.5.



Rys. 5.5. Proporcje pomiędzy wielkościami wskaźników ujętych w modelu oceny cyrkularności jachtu 2020

Porównanie wartości wskaźników ujętych w modelu oceny cyrkularności jachtu 2020 prowadzi do wniosku, że dominują pod względem wielkości wskaźniki uciążliwości

środowiskowej (17%) i intensywności użytkowania (15%). Z tej perspektywy hierarchia wskaźników pokazuje na kolejnych miejscach wskaźnik:

- zdatności do utylizacji termicznej – 14%,
- zdatności do recyklingu – 13%,
- potencjału do ponownego użycia – 11%,
- potencjału do remanufacturingu – 11%,
- potencjału do pełnienia innych funkcji – 8%,
- naprawialności – 7%,
- minimalizacji masy jachtu – 2%,
- zastosowania komponentów recykulowanych – 2%,
- zastosowania materiałów pierwotnych – 0%.

W oparciu o uzyskane wyniki można stwierdzić, że współczynniki wagowe nadane przez ekspertów mają kluczowe znaczenie dla wiarygodności wyników zastosowania modelu oceny cyrkularności. Trudno sobie bowiem wyobrazić sytuację, w której utylizacja termiczna byłaby jedną z trzech najbardziej preferowanych technologii zagospodarowania jachtu, gdy jego kadłub wykonany jest z laminatów. Taka interpretacja zaprzeczałaby założeniom koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym, w której utylizacja termiczna traktowana jest zazwyczaj jako ostateczny, najmniej pożądany wariant zagospodarowania obiektu technicznego.

Sumaryczny wskaźnik cyrkularności W_s jako kwintesencja modelu oceny zbieżności jachtu 2020 z koncepcją gospodarki o obiegu zamkniętym dostarcza szeregu cennych informacji. Jak wspomniano w rozdziale 5.2.2 sytuacja, w której projektanci mogą zmienić materiał kadłuba jachtu na wykonany ze stopów aluminium, wpłynęłaby korzystnie na wartość wskaźnika W_s . Jest to jednak technologia, której zastosowanie wiąże się z ograniczeniami w zakresie produkcji seryjnej, a przede wszystkim ze znaczącym wzrostem ceny jachtu 2020. W dalszym ciągu rozważań można zatem przyjąć, że projektanci jachtu mają ograniczony wpływ na dobór materiału kadłuba oraz na przeznaczenie jednostki pływającej, która eksploatowana w polskich warunkach żeglugi śródlądowej nie będzie eksploatowana dłużej niż średnio 6 miesięcy w roku.

W takiej sytuacji nadal pozostają możliwości poszukiwania poprawy wizerunku jachtu 2020 z perspektywy GOZ. Zasadne wydaje się przykładowo rozważenie scenariuszy, w których poszukiwane byłyby możliwości pogrubienia ścian kadłuba, analogicznie do konstrukcji laminatowych kadłubów z lat 70-ych i 80-tych XX wieku. Takie działanie mogłoby znacząco poprawić zdatność jachtu 2020 do napraw, a przede wszystkim zwiększyłoby jego potencjał do ponownego użycia i remanufacturingu. Istnieją jeszcze inne pola do poszukiwania możliwości udoskonaleń jachtu 2020 pod kątem jego cyrkularności. Dotyczą one przykładowo doboru i modyfikacji osprzętu, czy sposobów jego łączenia z konstrukcją kadłuba. Każdy z rozważanych scenariuszy zmian w konstrukcji jachtu 2020 mógłby być weryfikowany nie tylko przez pryzmat kryteriów technicznych i ekonomicznych. Jak wykazano przeprowadzonymi obliczeniami dla jachtu 2020, jednym z kryteriów oceny takich scenariuszy mogłaby być także wartość wskaźnika W_s jako elementu opracowanego modelu oceny cyrkularności jachtu.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracach naukowych na temat gospodarki o obiegu zamkniętym dominują badania poświęcone zagadnieniom makroekonomicznym, organizacyjnym oraz środowiskowym. Marginalizowane są natomiast aspekty inżynierskie. Brak wystarczającej wiedzy ukierunkowanej na techniczne aspekty GOZ, zwłaszcza z perspektywy projektowania obiektów technicznych pod kątem ich cyrkularności, jest problemem, który przekłada się na ograniczenia w efektywności wdrażania koncepcji GOZ, m.in. w zakresie praktyki funkcjonowania podmiotów gospodarczych. Jest to istotna nisza badawcza, gdyż to właśnie obiekty techniczne są materialnym nośnikiem wartości cyrkularnej w postaci różnego rodzaju zasobów. Ich wytworzenie, eksploatacja i zagospodarowanie po zakończeniu użytkowania wiążą się natomiast z koniecznością poniesienia nakładów energetycznych i materiałowych. Dlatego w niniejszej rozprawie doktorskiej podejmuje się problematykę gospodarki o obiegu zamkniętym w ujęciu technicznym i produktowym, uzupełniając istotne luki badawcze zidentyfikowane w tym obszarze.

Podsumowując realizację zadań rozprawy należy stwierdzić, że jej główny cel został osiągnięty, gdyż opracowano model oceny cyrkularności, przeznaczony do analizy jachtów pod kątem ich zgodności z założeniami koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Model ten ma wyjściowy potencjał, aby być, po adaptacji, stosowanym w odniesieniu do szerokiego spektrum środków transportu, a nawet różnej kategorii obiektów technicznych. W ramach prac badawczych ukierunkowanych na osiągnięcie celu głównego zrealizowano 4 cele szczegółowe, określone w rozdziale 3.

W pierwszej kolejności dokonano wyboru i scharakteryzowano kluczowe aspekty koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym, które przeznaczono do ujęcia w opracowywanym modelu oceny cyrkularności. Podstaw merytorycznych do wspomnianych działań (wyboru i charakterystyki aspektów GOZ) dostarczyły badania literaturowe, w ramach których dokonano przeglądu:

- definicji pojęcia gospodarki o obiegu zamkniętym,
- metod wdrażania koncepcji GOZ,
- sposobów mierzenia efektów działań ukierunkowanych na wdrażanie GOZ,
- przykładów wdrażania GOZ w wybranych gałęziach przemysłu.

Drugi cel szczegółowy rozprawy został osiągnięty, gdyż sformułowano zależności matematyczne pozwalające na określenie poziomu zgodności obiektów technicznych branży jachtowej z poszczególnymi aspektami koncepcji GOZ, czyli na ocenę poziomu ich cyrkularności. W ten sposób powstał zestaw wskaźników ilościowych (rozd. 4.2 rozprawy), do których stosowania konieczne było opracowanie klasyfikacji wybranych materiałów i komponentów stosowanych w budowie jednostek pływających. Wspomniane klasyfikacje zaprezentowane w rozdz. 4.4 rozprawy dotyczą:

- uciążliwości środowiskowej,
- podatności recyklingowej,
- zdolności do utylizacji termicznej.

Trzeci cel szczegółowy osiągnięto przez opracowanie sumarycznego wskaźnika cyrkularności, który stanowi kwintesencję modelu oceny scharakteryzowanego w rozdziale 4.3 rozprawy. W ramach prac nad tym modelem dokonano hierarchizacji wskaźników jednostkowych ujętych we wskaźniku sumarycznym. Aby to zrealizować, przeprowadzono badanie eksperckie oparte na metodzie delfickiej, którego wynikiem jest zbiór wag, jakie przypisano poszczególnym aspektom koncepcji GOZ, wyrażonym we wskaźnikach jednostkowych. Dzięki przeprowadzonemu badaniu i integracji wskaźników jednostkowych (z uwzględnieniem ich istotności z perspektywy koncepcji GOZ) powstał sumaryczny wskaźnik cyrkularności, który w postaci jednej liczby wyraża poziom spełnienia postulatów odpowiadających wszystkim wybranym aspektom GOZ.

Czwarty cel szczegółowy wyznaczony do realizacji w ramach niniejszej rozprawy osiągnięto przez weryfikację opracowanego modelu oceny cyrkularności na przykładzie wybranego jachtu. Przeprowadzone w tym zakresie prace polegały kolejno na:

- wyborze i charakterystyce jachtu 2020, który posłużył jako przedmiot badań,
- inwentaryzacji danych niezbędnych do prac obliczeniowych,
- obliczeniu jednostkowych wskaźników cyrkularności jachtu,
- wyznaczeniu wartości sumarycznego wskaźnika cyrkularności,
- analizie i interpretacji osiągniętych wyników.

Dzięki realizacji wymienionych prac, które zaprezentowano w rozdziale 5 rozprawy, określono poziom spełnienia założeń wynikających z GOZ w ramach poszczególnych aspektów tej koncepcji, w postaci zbioru poszczególnych wskaźników cyrkularności oraz w sposób zintegrowany, w formie sumarycznego wskaźnika cyrkularności. W ten sposób wykazano możliwość zastosowania opracowanego modelu oceny cyrkularności na przykładzie jednostki pływającej, co stanowiło warunek osiągnięcia ostatniego wyznaczonego celu szczegółowego wyznaczonego w rozprawie. Tym samym, w związku z realizacją wszystkich zadań wynikających z celów szczegółowych, cel główny rozprawy został osiągnięty.

Najważniejsze wnioski wynikające z zaprezentowanych prac badawczych, co do możliwości wykorzystania modelu oceny cyrkularności w odniesieniu do jachtu, jako wybranego środka transportu wyszczególniono poniżej.

1. Możliwe okazało się przeprowadzenie analizy ilościowej zgodności jachtu z założeniami koncepcji GOZ, w oparciu o opracowany w pracy model oceny cyrkularności.
2. Wyniki przeprowadzonej analizy pozwoliły określić w wartościach liczbowych na ile badany obiekt odpowiada założeniom GOZ w ramach każdego analizowanego aspektu.
3. Weryfikacja opracowanego modelu dokonana na podstawie oceny cyrkularności wybranego jachtu wykazała, że możliwe jest zidentyfikowanie obszarów o największym potencjale do doskonalenia oraz tych obszarów, w których obiekt wykazuje się wysokim zaawansowaniem pod względem cyrkularności.
4. W przeprowadzonej ocenie cyrkularności jachtu 2020 stwierdzono:

- zastosowanie w jego budowie wyłącznie materiałów pierwotnych, co z perspektywy GOZ jest sytuacją skrajnie niekorzystną,
- umiarkowane efekty działań w zakresie doboru materiałów o niskiej uciążliwości środowiskowej,
- znikomy potencjał do zastosowania używanych komponentów w konstrukcji jachtu oraz niewielkie możliwości ponownego użycia komponentów po zakończeniu eksploatacji jachtu,
- umiarkowane ukierunkowanie konstrukcji jachtu na zapewnienie zdolności do napraw, remanufacturingu czy pełnienia innej funkcji po zakończeniu eksploatacji,
- znaczący poziom zdolności do recyklingu i utylizacji termicznej, które jednak w przypadku jachtów są bardzo kosztowne, a z perspektywy założeń GOZ są traktowane jako scenariusz najmniej korzystny,
- duże możliwości poprawy wizerunku jachtu 2020 z perspektywy jego cyrkularności w ramach poszczególnych aspektów GOZ przez modyfikację materiału konstrukcji kadłuba (np. zamiana z laminatu na aluminium) oraz zapewnienie możliwości powtórnego wykorzystania użytych komponentów (np. kadłuba i balastu).

5. Analiza dokonana z użyciem sumarycznego wskaźnika cyrkularności pozwoliła na określenie w sposób ilościowy, na ile oceniany obiekt odpowiada wszystkim założeniom koncepcji GOZ, czyli na ile jest on cyrkularny. Wartość wskaźnika $W_s = 0,349$. Ze względu na fakt, że nie przeprowadzono jeszcze podobnych analiz dla innych jachtów, nie można przesądzać o tym, na ile jest to wynik korzystny lub niekorzystny, oczywiście w stosunku do innych podobnych konstrukcji.

Przeprowadzone prace badawcze dają podstawy do stwierdzenia, że opracowany model oceny cyrkularności ma potencjał, aby być stosowanym nie tylko w odniesieniu do innych rodzajów środków transportu, ale też do różnych obiektów technicznych. Model ten może być bowiem stosowany przykładowo w:

- badaniach naukowych, w których poszukiwane są kierunki doskonalenia obiektów technicznych,
- pracach realizowanych przez inżynierów kształtujących obiekty techniczne, jako narzędzie wspomagające w procesach podejmowania decyzji,
- analizach porównawczych różnych obiektów technicznych, pełniących te same funkcje, istotnych z perspektywy wyborów dokonywanych przez konsumentów,
- analizach wykonywanych na zamówienie organizacji pozarządowych, które wyrażają opinie m.in. w ramach dyskusji na temat kierunków zmian rynkowych,
- badaniach wykonywanych na zamówienie różnego rodzaju instytucji, które mogą wprowadzać systemowe rozwiązania, np. dotyczące subsydiowania działań ukierunkowanych na wdrażanie GOZ.

Stosowanie opracowanego modelu oceny cyrkularności w odniesieniu do szerszego spektrum obiektów, innych niż jachty, jest uwarunkowane ograniczeniami, które omówiono poniżej.

- A. Ograniczenia związane z potencjalnym zastosowaniem modelu w analizach wszystkich rodzajów środków transportu są związane ze specyfiką opracowanych w ramach rozprawy klasyfikacji. Zakres danych ujętych w opracowanych klasyfikacjach (uciążliwości środowiskowej, podatności recyklingowej i zdolności do utylizacji termicznej) jest ograniczony do materiałów i komponentów charakterystycznych dla budowy jednostek pływających, a szczególnie jachtów. Aby zatem opracowany model oceny cyrkularności stosować w odniesieniu do szerokiego spektrum środków transportu, konieczne jest rozszerzenie zakresu danych ujętych w wymienionych klasyfikacjach.
- B. Analogiczne ograniczenie warunkuje możliwość zastosowania opracowanego modelu w odniesieniu do różnych kategorii obiektów technicznych. Uszczegółowienie zaproponowanych klasyfikacji o inne materiały i komponenty stosowane w budowie różnych kategorii obiektów technicznych będzie jednak działaniem bardzo pracochłonnym i czasochłonnym.
- C. Kolejne istotne ograniczenie związane ze stosowaniem modelu oceny cyrkularności w odniesieniu do różnych kategorii obiektów technicznych dotyczy współczynników (wag), które wskazują na istotność poszczególnych aspektów GOZ w całym spektrum działań ukierunkowanych na zapewnienie cyrkularności obiektu, odzwierciedlonym w sumarycznym wskaźniku cyrkularności. W niniejszej rozprawie wagi przypisane do wskaźników jednostkowych cyrkularności ustalono w badaniu eksperckim przy założeniu, że odnoszą się one jedynie do jachtów. Nie można tego jednak stwierdzić w odniesieniu do różnych kategorii obiektów technicznych. A zatem, aby stosować opracowany model oceny cyrkularności w odniesieniu do innych kategorii obiektów technicznych, zasadne jest weryfikowanie, czy zaproponowane w badaniu eksperckim dla jachtów wagi (odniesione do jednostkowych wskaźników cyrkularności) są aktualne dla tych obiektów.

Z pewnością można jednak stwierdzić, że mimo wskazanych powyżej ograniczeń, ilościowe określenie stopnia cyrkularności z wykorzystaniem opracowanego modelu umożliwia ocenę poziomu spełnienia założeń koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym przez różne obiekty, o podobnym charakterze. Prezentacje wyników oceny w postaci zestawu liczb (zbiór wskaźników jednostkowych) oraz jednej liczby (sumaryczny wskaźnik cyrkularności) wspierają aplikacyjność i potencjalną uniwersalność zastosowań modelu.

Przekładając przedstawione wyniki dokonań rozprawy na codzienną pracę inżynierów istotne jest to, że opracowany model może być ukierunkowany nie tylko na ocenę obiektu, ale też umożliwia identyfikację obszarów wymagających poprawy, co wspiera procesy projektowania, optymalizacji produktów i procesów oraz podnoszenie efektywności wykorzystania zasobów. Tym samym niniejsza rozprawa wpisuje się w nurt badań dotyczących nie tylko zagadnień środowiskowych, lecz przede wszystkim inżynierskich i strategicznych, mając bezpośredni wpływ na innowacyjność, efektywność zasobową i konkurencyjność proponowanych rozwiązań.

LITERATURA

Publikacje naukowe

- [1] Allwood J.M., Ashby M.F., Gutowski T.G., Worrell E., Material efficiency: A white paper, *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, vol. 55, nr 3, s. 362–381.
- [2] Ardente F., Wolf M., A., Mathieux F., Pennington, D., Integration of resource efficiency and waste management criteria in the implementing measures under the Ecodesign Directive – In-depth analysis of the measurement and verification approaches, identification of the possible gaps and recommendations (Deliverable 2). Luxembourg, Publications Office of the European Union. (JRC Scientific and Technical Reports), 2011.
- [3] Arora M., Raspall F., Fearnley L., Silva A., Urban mining in buildings for a circular economy: Planning, process and feasibility prospects, *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 174, art. 105754.
- [4] Avagyan A., Addressing the criticism on flags of convenience, *Southwestern Journal of International Law*, 2022, vol. 28, nr 1, s. 129–147.
- [5] Azhar S., Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry, *Leadership and Management in Engineering*, 2011, vol. 11, nr 3, s. 241–252.
- [6] Bałdowska-Witos P., Doerffer K., Pysz M., Doerffer P., Tomporowski A., Opielak M., Manufacturing and recycling impact on environmental life cycle assessment of innovative wind power plant. Part 2/2, *Materials*, 2021, vol. 14, nr 1, art. 204.
- [7] Bocken N.M.P., de Pauw I., Bakker C., van der Grinten B., Product design and business model strategies for a circular economy, *Journal of Industrial and Production Engineering*, 2016, vol. 33, nr 5, s. 308–320.
- [8] Boulding K.E., The economics of the coming spaceship Earth, w: Jarrett H. (red.), *Environmental quality in a growing economy*, *Resources for the Future*. Johns Hopkins University Press, 1966, s. 3–14.
- [9] Boyer R. H. W., Mellquist A.Ch., Willander M., Fallahi S., Nyström T., Linder M., Algurén P., Vanacore E., Hunka A.D., Rex E., Whalen K., A.Three-dimensional product circularity. *Journal of Industrial Ecology*, 2021.
- [10] Brezet H., Van Hemel C., *Ecodesign: A Promising Approach to Sustainable Consumption and Production*. Paris: United Nations Environment Programme, 1997.
- [11] Brunner P.H., Rechberger H., Practical handbook of material flow analysis, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 9, s. 337- 338, 2004.
- [12] Burchart-Korol D., *Ekoprojektowanie – holistyczne podejście do projektowania, Problemy Ekologii*, 2010, t. 14, nr 3, s. 129–133.
- [13] Cabeza L.F., Rincón L., Vilariño V., Pérez G., Castell A., Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building

- sector. A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 29, s. 394–416.
- [14] Charter M., Keiller S., Grassroots innovation and the circular economy. A global survey of repair cafés and hackerspaces, The Centre for Sustainable Design, University for the Creative Arts, 2014.
 - [15] Chertow M.R., Industrial symbiosis: Literature and taxonomy, *Annual Review of Energy and the Environment*, 2000, vol. 25, nr 1, s. 313–337.
 - [16] Cordella M., Alfieri F., Sanfelix J., Methods for the Assessment of the Reparability and Upgradability of Energy-related Products: Application to TVs, EUR 30000 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019.
 - [17] Crul, M. R. M.; Diehl, J. C., Design for sustainability: a practical approach for developing economies, United Nations Environment Programme, Delft University of Technology, 2006.
 - [18] Daly H.E., Beyond growth. The economics of sustainable development, Island Press, 1996.
 - [19] De Fazio D., Boccarusso L., Formisano A., Viscusi A., Durante M., A Review on the Recycling Technologies of Fibre-Reinforced Plastic (FRP) Materials Used in Industrial Fields, A review, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, nr 4, art. 851.
 - [20] Di Maio F., Rem P.C., A robust indicator for promoting circular economy through recycling, *Journal of Environmental Protection*, 2015, vol. 6, nr 10, s. 1095–1104.
 - [21] Di Maio F., Rem P.C., Baldé K., Polder M., Measuring resource efficiency and circular economy: A market value approach, *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, vol. 122, s. 163–171.
 - [22] Duflou J.R., Seliger G., Kara S., Umeda U., Ometto A., Willems B., Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study, *CIRP Annals*, 2008, vol. 57, nr 2, s. 583–600.
 - [23] Fletcher K., Sustainable fashion and textiles. Design journeys, wyd. 2., London, Routledge, 2013.
 - [24] Folęga P., Burchart-Korol D., Environmental assessment of road transport in a passenger car using the life cycle approach, *Transport Problems*, 2017, 12(2), 157–168.
 - [25] Franco M.A., Circular economy at the micro level: A dynamic view of incumbents' struggles and challenges in the textile industry, *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 168, s. 833–845.
 - [26] Frosch R.A., Gallopoulos N.E., Strategies for manufacturing, *Scientific American*, 1989, vol. 261, nr 3, s. 144–153.
 - [27] Geng Y., Fu J., Sarkis J., Xue B., Towards a national circular economy indicator system in China: An evaluation and critical analysis, *Journal of Cleaner Production*, 2012, vol. 23, s. 216–224.
 - [28] Gharfalkar M., Court R., Campbell C., Ali Z., Hillier G., Analysis of waste hierarchy in the European waste directive 2008/98/EC, *Waste Management*, 2015, vol. 39, s. 305–313.

- [29] Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S., A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 114, s. 11–32.
- [30] Golbabaei F., Bunker J., Yigitcanlar T., Baker D., Mirhashemi A. i Paz A., Sustainable end-of-life management of abandoned and derelict vessels through the lens of circular economy, *Journal of Cleaner Production*, 2024, Vol. 474, ar., 143559
- [31] Haas W., Krausmann F., Wiedenhofer D., Heinz M., How circular is the global economy? An assessment of material flows, waste pvroduction, and recycling in the European Union and the world in 2005, *Journal of Industrial Ecology*, 2015, vol. 19, nr 5, s. 765–777.
- [32] Harper G. et al., Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles, *Nature*, 2019, vol. 575, nr 7781, s. 75–86.
- [33] Heisel F., Ciobanu A., McGranahan J., Industry and literature review of urban mining applications in the United States. Gaps and drivers for implementation towards a circular industrialized construction economy, *Journal of Circular Economy*, 2024.
- [34] Hislop H., Hill J., Reinventing the wheel. A circular economy for resource security, *Green Alliance*, 2011.
- [35] Hybel S.B., Re-design for disassembly as opportunities to prepare for a circular economy, *Rozprawa doktorska*, University of Southern Denmark, Faculty of Technology, 2024.
- [36] Ijomah W., A model-based definition of the generic remanufacturing business proces. Thesis, University of Plymouth, 2002.
- [37] Ijomah W.L., McMahon C.A., Hammond G.P., Newman S.T., Development of design for remanufacturing guidelines to support sustainable manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, vol. 23, nr 6, s. 712–719.
- [38] King A.M., Burgess S.C., Ijomah W., McMahon C.A., Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle?, *Sustainable Development*, 2006, vol. 14, nr 4, s. 257–267.
- [39] Kirchherr J., Reike D., Hekkert M., Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, vol. 127, s. 221–232.
- [40] Kłojzy-Karczmarczyk B., Staszczak J., Szacowanie masy frakcji energetycznych w odpadach komunalnych wytwarzanych na obszarach o różnych o różnym charakterze zabudowy, *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 2017, t. 20(2), s. 143-154.
- [41] Kłós Z., Kasprzak J., Kurczewski P., Koncepcja, kształtowanie i ocena cyklu życia urządzeń technicznych, *Problemy Eksploatacji*, 2012, nr 1, s. 187–199.
- [42] Kłós Z., Kurczewski P., Metody oceny właściwości środowiskowych w projektowaniu, *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Maszyny Robocze i Transport*, 2005, nr 59, s. 95–106.

- [43] Kłos Z., Kurczewski P., Kasprzak J., Środowiskowe charakteryzowanie maszyn i urządzeń. Podstawy ekologiczne, metody i przykłady, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.
- [44] Köpman J., Majava J., The role of product design in advancing the circular economy of electric and electronic equipment, *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 2024, vol. 21, art. 200-207.
- [45] Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J., Circular economy: The concept and its limitations, *Ecological Economics*, 2018, vol. 143, s. 37–46.
- [46] Kowalski Z., Kulczycka J., Banach M., Makara A., A Complex circular economy quality indicator for assessing production systems at the micro level, *Sustainability*, 2023, vol. 15, nr 18, art. 13495.
- [47] Kulczycka J. (red.), *Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych*, Kraków, Wydawnictwo IGSMiE PAN, 2019.
- [48] Kulczycka J., Kowalski Z., Lewandowska A., Lelek Ł., Zasady pomiarów efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów. *Ekonomia i Środowisko*, 2017, nr 1(60).
- [49] Kulczycka J., Lewandowska A., Joachimiak-Lechman K. i Kurczewski P., Circular economy of materials from the life cycle perspective: A case study of life cycle assessment of secondary fence boards – part 1 (baseline scenario), *Resources*, 2024, 13(4), s. 50.
- [50] Kumar V., Sezersan I., Garza-Reyes J.A., Gonzalez E.D.R.S., Al-Shboul M.A., Circular economy in the manufacturing sector: benefits, opportunities and barriers, *Management Decision*, 2019, vol. 57, nr 4, s. 1067–1086.
- [51] Kusch S., Hills C.D., The link between e-waste and GDP – new insights from data from the Pan-European region, *Resources*, 2017, vol. 6, nr 2, art. 15
- [52] Larsson L., Eliasson R.E., *Podstawy projektowania jachtów*, tłum. M. Orych, Alma-Press, Warszawa 2006.
- [53] Laser S., Stowell A., Thinking like Apple's recycling robots: Toward the activation of responsibility in postenvironmentalist world, *Ephemera. Theory and Politics in Organization*, 2020, vol. 20, nr 4, s. 51–77.
- [54] Legutko S. *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2004
- [55] Lewandowska A., Kulczycka J., Kasprzak J., Szperling A., Generowicz-Caba N., Efektywność środowiskowa w cyklu życia jednostek pływających, w tym wodorowych – przegląd badań LCA, *Kwartalnik Krakowskiego Towarzystwa Technicznego*, 2024, nr 197, s. 3-10.
- [56] Lewandowska A., LCA applications and their impact on the goal and scope of the study, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu*, 2017, nr 151, s. 81–87.
- [57] Linder M., Sarasini S., van Loon P., A metric for quantifying product-level circularity, *Journal of Industrial Ecology*, 2017, vol. 21, nr 3, s. 545–558.
- [58] Linder M., Williander M., Circular business model innovation: inherent uncertainties, *Business Strategy and the Environment*, 2017, vol. 26, nr 2, s. 182–196.

- [59] Lund T.R., Remanufacturing: the experience of the United States and implications for developing countries, Washington, DC (USA) World Bank, 1984.
- [60] McDonough W., Braungart M., Cradle to cradle: Remaking the way we make things. New York, North Point Press, 2002.
- [61] Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens III W.W., Granice wzrostu: Raport dla Klubu Rzymskiego z Projektu Dylemat ludzkości, tłum. Z. Stempowski, Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, 1973.
- [62] Merkisz-Guranowska A., Kiciński M., Wielokryterialna ocena systemów recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 2017, z. 117, s. 207–219.
- [63] Merkisz-Guranowska A., Product recycling of automotive parts – trends and issues, Combustion Engines, 2017, t. 56, nr 4 (171), s. 24–28.
- [64] Mielnik D., System kaucyjny obejmujący opakowania na napoje z tworzyw sztucznych w świetle ustawy z dnia 13 lipca 2023 r., Prawo i Klimat, 2023, nr 4.
- [65] Milewski, Z. J., *Projektowanie i budowa jachtów żaglowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2001.
- [66] Moreno M., De los Rios C., Rowe Z., Charnley F., A conceptual framework for circular design, Sustainability, 2016, vol. 8, nr 9, art. 937.
- [67] Nowak J., (red.). Inżynieria eksploatacji maszyn, Koszalin, Politechnika Koszalińska, 2014.
- [68] Nussholz J.L.K., Rasmussen F.N., Whalen K., Plepy A., Material reuse in buildings: Implications of a circular business model for sustainable value creation, Journal of Cleaner Production, 2020, vol. 245, art. 118546
- [69] Okorie O., Salonitis K., Charnley F., Moreno M., Turner C., Tiwari A., Digitisation and the circular economy: A review of current research and future trends, Energies, 2018, vol. 11, nr 11, art. 3009.
- [70] Pawłowska B., Koźlak A., Transport i gospodarka morska w inteligentnych specjalizacjach jako czynnik poprawy konkurencyjności regionów w Polsce, Problemy Transportu i Logistyki, 2017, nr 34.
- [71] Pawłowska B., Zrównoważony rozwój transportu jako przykład poprawy efektywności sektora, Acta Universitatis Lodzensis. Folia Oeconomica, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2015, nr 313,
- [72] Pearce D.W., Turner R.K., Economics of natural resources and the environment, Harvester Wheatsheaf, 1990.
- [73] Piotrowska K., Tomporowski A., Piasecka I., Środowiskowa analiza wybranych możliwości zagospodarowania poużytkowego opon samochodowych, Przemysł Chemiczny, 2018, nr 10, s. 51–55.
- [74] Potting J., Hekkert M., Worrell E., Hanemaaijer A., Circular economy: Measuring innovation in the product chain, PBL Publishers, Netherlands Environmental Assessment Agency, 2017.
- [75] Reuter M.A., van Schaik A., Ballester M., Limits of the circular economy. Fairphone modular design pushing the limits, World of Metallurgy – Erzmetall, vol. 71, nr 2, 2018.

- [76] Roskłodka N., Bressanelli G., Saccani N., Miragliotta G., Repairable electronic products for the circular economy. A review of design for repair features, practices and measures to contrast obsolescence, *Discover Sustainability*, 2025, vol. 6, art. 66.
- [77] Saidani M., Kim, H., Cluzel, F., Leroy Y., Yannou, B. Product circularity indicators: what contributions in designing for a circular economy, *Proceedings of the Design Society: Design Conference 2020*, Cambridge. Cambridge University Press, 2020.
- [78] Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., Kendall A., A taxonomy of circular economy indicators, *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 207, s. 542–559.
- [79] Schiermeier Q., Boom in ships that fly 'fake' flags and trash the environment, *Nature*, 2021.
- [80] Scrioșteanu A., Criveanu M.M., Reverse logistics of packaging waste under the conditions of a sustainable circular economy at the level of the European Union states, *Sustainability*, 2023, vol. 15, nr 20, art. 14727.
- [81] Seitz M.A., A critical assessment of motives for product recovery: the case of engine remanufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 2007, vol. 15, nr 11–12, s. 1147–1157.
- [82] Singh J., Ordoñez I., Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy, *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 134, s. 342–353.
- [83] Sobczak R., Inżynier: wiedza, technika, technologia, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG*, nr 52, 2017.
- [84] Stahel W.R., Product life as a variable: the notion of utilization, *Science and Public Policy*, Beech Tree Publishing, vol.13, nr 4, s. 185-193
- [85] Stahel W.R., Reday-Mulvey G., *Jobs for tomorrow: The potential for substituting manpower for energy*, New York, Vantage Press, 1981.
- [86] Stahel W.R., The business angle of a circular economy—higher competitiveness, higher resource security and material efficiency, *A new dynamic: Effective business in a circular economy*, Ellen MacArthur Foundation, vol. 1, 2013, s. 11-32.
- [87] Stahel W.R., The circular economy, *Nature*, 2016, vol. 531, nr 7595, s. 435–438.
- [88] Stahel W.R., *The performance economy*, wyd. 2. London, Palgrave Macmillan, 2010.
- [89] Sundin E., Lee H.M., In what way is remanufacturing good for the environment? In: Matsumoto M., Umeda Y., Masui K., Fukushige S. (eds), *Design for innovative value towards a sustainable society*, Springer, 2012,
- [90] Sung K., Cooper T., Kettley S., Individual upcycling practice: exploring the possible determinants of upcycling based on a literature review, *Proceedings of the 2nd PLATE Conference*, Nottingham Trent University, 2014, s. 1–6.
- [91] Turner A., Rees A., The environmental impacts and health hazards of abandoned boats in estuaries, *Regional Studies in Marine Science*, 2016, vol. 6, nr 1–2, s. 75-82

- [92] Ulrich K. T., Eppinger S. D., Yang M. C., Product design and development (7th ed.), McGraw Hill Education, 2020.
- [93] van Buren N., Demmers M., van der Heijden R., Witlox F., Towards a circular economy. The role of dutch logistics industries and governments, Sustainability, 2016, vol. 8, nr 7, art. 647.
- [94] van Dolderen D.C., Aghaeian S., Bakker, C.A., Balkenende R., Design for recycling of electronics: The urgent need for better methods, Electronics Goes Green 2024+ From Silicon to Sustainability, IEEE, 2024, s. 1–6.
- [95] van Eijk F., Barriers and drivers towards a circular economy. Literature review. A-140315-R-Final, Netherlands Circular Hotspot, 2015, s. 1–25.
- [96] Vanegas P., Peeters J., Cattrysse D., Duflou J., et al., Ease of disassembly of products to support circular economy strategies, Resources, Conservation and Recycling, 2018, vol. 135, 323–334,
- [97] Villalba G., Segarra M., Chimenos J.M., Espiell, F., A proposal for quantifying the recyclability of materials, Resources, Conservation and Recycling, 2002, vol. 37(1), s. 39–53.
- [98] Villalba G., Segarra M., Chimenos J.M., Espiell, F., Using the recyclability index of materials as a tool for design for disassembly, Ecological Economics, 2004, vol. 50 (3–4), s. 195–206.
- [99] Walichnowska P., Flizikowski J., Tomporowski A., Opielak M., Cieřlik W., The environmental analysis of the post-use management scenarios of the heat-shrinkable film, Polymers, 2025, vol. 17, iss. 5, art. 690.
- [100] Wimmer W., Züst R., Ecodesign Pilot. Product Investigation. Learning and Optimization Tool for Sustainable Product Development, Springer, 2001.
- [101] Wojciechowska P., Wiszumirska K., Opakowania wielokrotnego uęytku – znane rozwiązania w nowej odsłonie, Kierunek Farmacja, 2023, nr 4, s. 58–61.
- [102] Yuan Z., Bi J., Moriguichi Y., The circular economy. A new development strategy in China, Journal of Industrial Ecology, 2006, vol. 10, nr 1–2, s. 4–8.
- [103] Zorpas A.A., Navarro-Pedreno J., Panagiotakis I., Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models. Plastic, textile and electro-electronic cases, Journal of Cleaner Production, 2020, vol. 242, art. 118392.
- [104] Źmudzińska D., Systemy opakowań wielokrotnego uęytku – wymogi, inspiracje, czynniki sukcesu, Logistyka, 2024, nr 1, s. 60–64.

Raporty i strategie

- [S.1] Ellen MacArthur Foundation and Granta Design, Circularity indicators: An approach to measuring circularity – methodology, Cowes, Ellen MacArthur Foundation, 2015 [online], dostęp z dnia 3.10.2024, dostępne: <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/77e62bc9924c20d0/original/Circularity-Indicators-Methodology.pdf>
- [S.2] Ellen MacArthur Foundation, A New Textiles Economy, Redesigning fashion's future. 2017, [online], dostęp z dnia 3.05.2025, dostępne: <https://ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy>

- [S.3] Ellen MacArthur Foundation, Towards the circular economy. Vol. 1. An economic and business rationale for an accelerated transition, Cowes, Ellen MacArthur Foundation, 2012.
- [S.4] European Circular Economy Stakeholder Platform, Design for recycling, Best practices in circular packaging, 2022, [online], dostęp z dnia 3.05.2025, dostępne: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/knowledge/design-recycling-best-practices-circular-packaging>
- [S.5] European Commission, Ecodesign for sustainable products regulation and textiles strategy, 2024, [online], dostęp z dnia 3.05.2025, dostępne: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC138903>
- [S.6] Granta Design, Circularity indicators project: methodology (v2.0), Cowes, Ellen MacArthur Foundation, 2015, [online], dostęp z dnia 23.01.2023, dostępne: <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/5df196c8314ff61f/original/Circularity-Indicators-Project-Overview.pdf>
- [S.7] Komisja Europejska, Komunikat Komisji do Rady i Parlamentu Europejskiego w sprawie wykładni przepisów prawa wspólnotowego dotyczących zamówień publicznych i możliwości uwzględniania aspektów środowiskowych w zamówieniach publicznych, COM (2001) 274 final, 4 lipca 2001.
- [S.8] Komisja Europejska, Plan działania na rzecz zrównoważonej konsumpcji i produkcji oraz zrównoważonej polityki przemysłowej, COM (2008) 397 final, 16 lipca 2008.
- [S.9] Komisja Europejska, Zielona infrastruktura – zwiększanie kapitału naturalnego Europy. COM (2013) 249 final, 6 maja 2013.
- [S.10] Komisja Europejska, Zintegrowana polityka produktowa – budowanie na podstawie cyklu życia produktu. COM (2003) 302 final, 18 czerwca 2003.
- [S.11] Luxembourg Ministry of Economy, Guidance Document: Product circularity data sheet (PCDS), Version 3.2. 2020, [online], dostęp z dnia 3.05.2025, dostępne: https://pcds.lu/wp-content/uploads/2020/11/20200213_GuidanceDocument_PCDS_light_v3.2_FINAL.pdf
- [S.12] Ministerstwo Infrastruktury, *Reja24 – System rejestracji jednostek pływających*. Warszawa: Ministerstwo Infrastruktury, Dostępne na: <https://www.reja24.gov.pl> [Dostęp: 8.07.2025].
- [S.13] Ministerstwo Przedsiębiorczości i Technologii, Mapa drogowa transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Załącznik do dokumentu „Krajowy plan działań dotyczący zrównoważonej produkcji i konsumpcji”, 2019.
- [S.14] Polski Rejestr Statków S.A., Zasady klasyfikacji i budowy – Jachty rekreacyjne. Gdańsk: PRS, 2024.
- [S.15] Technopolis Group, Fraunhofer ISI, Study on the development of a common European framework for digital product passports, Publications Office of the European Union, 2021, [online], dostęp z dnia 18.11.2024, dostępne: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/44a96153-6e3f-11ec-9c6c-01aa75ed71a1>

Uregulowania normatywne i prawne

- [N.1] BS 8001:2017 – Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations, London, British Standard Institution, Standards Publication, 2017.
- [N.2] Bundesministerium der Justiz. Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) – Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten [German Act on Electrical and Electronic Equipment], BGBl, I S, 1730, 2023.
- [N.3] Decyzja nr 1386/2013/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 listopada 2013 r. w sprawie ogólnego unijnego programu działań w zakresie środowiska do 2020 r., *Dobre życie, z uwzględnieniem ograniczeń naszej planety*, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 354, 2013, s. 171–200.
- [N.4] Dyrektywa 2008/98/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 312, 22.11.2008, s. 3–30.
- [N.5] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/53/UE z dnia 20 listopada 2013 r. w sprawie rekreacyjnych jednostek pływających i skuterów wodnych oraz uchylająca dyrektywę 94/25/WE. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 354 z 28.12.2013, s. 90–131.
- [N.6] EN 45554:2020 – General methods for the assessment of the ability to repair, reuse and upgrade energy-related products, Brussels, European Committee for Standardization, 2020.
- [N.7] EN 45557:2020 – General method for assessing the proportion of recycled material content in energy-related products, Brussels, European Committee for Standardization, 2020.
- [N.8] ISO 20887:2020 – Sustainability in buildings and civil engineering works — Design for disassembly and adaptability, International Organization for Standardization.
- [N.9] ISO 59004:2024 – Circular economy – Terminology, principles and guidance, Geneva, International Organization for Standardization, 2024.
- [N.10] ISO 59010:2024 – Circular economy – Guidance on business models and value chains, Geneva, International Organization for Standardization, 2024.
- [N.11] ISO 59020:2024 – Circular economy – Measuring and assessing circularity performance, Geneva, International Organization for Standardization, 2024.
- [N.12] ISO 59040:2024 – Circular economy – Implementation – Guidelines, Geneva, International Organization for Standardization, 2024.
- [N.13] ISO/TC 323 – Circular economy. Scope and structure, Geneva, International Organization for Standardization, 2019.
- [N.14] Kodeks morski z dnia 18 września 2001 r. Dziennik Ustaw 2001, nr 138, poz. 1545 z późn. zm.
- [N.15] Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu (SOLAS), International Maritime Organization, 1974, z późn. zm.
- [N.16] Międzynarodowa konwencja o zapobieganiu zanieczyszczaniu morza przez statki (MARPOL), International Maritime Organization, 1973/78, z późn. zm.

- [N.17] PN-EN ISO 12217 – Małe statki – Stateczność i pływalność, Polski Komitet Normalizacyjny, 2017.
- [N.18] PN-EN ISO 12217-1:2017-04, Małe statki – Stateczność i pływalność – Część 1: Statki o długości kadłuba powyżej lub równej 6 m z napędem żaglowym i bez napędu mechanicznego, Polski Komitet Normalizacyjny, 2017.
- [N.19] PN-EN ISO 8666:2021-04 – Małe statki – Dane główne Polski Komitet Normalizacyjny, 2021.
- [N.20] Rozporządzenie (WE) nr 1221/2009 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 listopada 2009 r. w sprawie dobrowolnego uczestnictwa organizacji we wspólnotowym systemie ekozarządzania i audytu (EMAS), Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 342, 2009, s. 1–45.
- [N.21] Rozporządzenie (WE) nr 66/2010 z dnia 25 listopada 2009 r. w sprawie oznakowania ekologicznego UE, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 27 z 30.01.2010, s. 1–19.
- [N.22] Rozporządzenie Ministra Sportu i Turystyki oraz Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 22 maja 2013 r. w sprawie szczegółowych warunków uzyskiwania upoważnienia do przeprowadzania egzaminu potwierdzającego posiadanie odpowiedniej wiedzy i umiejętności z zakresu żeglarstwa oraz warunków kadrowych i organizacyjnych koniecznych do przeprowadzania tego egzaminu, Dz.U. 2013, poz. 602.
- [N.23] Ustawa z dnia 12 kwietnia 2018 r. o rejestracji jachtów i innych jednostek pływających. Dz.U. 2018, poz. 777.
- [N.24] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. z 2023 r. poz. 1587, z późn. zm.).
- [N.25] Ustawa z dnia 21 grudnia 2000 r. o żegludze śródlądowej. Dz.U. 2022, poz. 2095; tekst jednolity: Dz.U. 2025, poz. 18.
- [N.26] Zalecenie 2013/179/UE Komisji Europejskiej z dnia 9 kwietnia 2013 r. w sprawie stosowania wspólnych metod pomiaru i przekazywania informacji o efektywności środowiskowej produktów i organizacji przez cały cykl życia, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 124, 4.05.2013, s. 1–210

Źródła internetowe i branżowe

- [I.1] <https://btj.com.pl/2023/01/17/co-jest-lodzcia-jachtem-statkiem-a-co-okretem-o-nazewnictwie-wszystkiego-co-plywa> [dostęp z dnia: 8.07.2025].
- [I.2] https://cdn.c2ccertified.org/resources/certification/standard/STD_C2C_Certified_V4.0_FINAL_031621.pdf [dostęp z dnia 3.05.2025].
- [I.3] <https://circular.fashion/en/software/circularity-id.html> [dostęp z dnia 3.05.2025].
- [I.4] <https://circularitycheck.ch/en/welcome> [dostęp z dnia 3.05.2025].
- [I.5] <https://jacht2020.pl/o-jachcie-2/> [dostęp z dnia: 8.07.2025]
- [I.6] <https://mbdc.com/how-to-get-your-product-cradle-to-cradle-certified/> [dostęp z dnia 12.012.2024].
- [I.7] <https://www.apple.com/newsroom/2022/04/apple-expands-the-use-of-recycled-materials-across-its-products/> [dostęp z dnia 23.12.2024].

- [I.8] <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/sustainable-production/bmw-designing-for-circularity-to-lead-in-sustainability/46144.article> [dostęp z dnia 7.04.2023].
- [I.9] <https://www.eongroup.com> [dostęp z dnia: 3.05.2025].
- [I.10] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/catamaran-market-report> [dostęp 30.07.2025]
- [I.11] <https://www.renaultgroup.com/en/group/refactory/> [dostęp z dnia: 3.05.2025].
- [I.12] <https://www.wbcd.org/resources/circular-transition-indicators-v3.0/> [dostęp z dnia 13.12.2024].
- [I.13] https://www.yachtingmonthly.com/cruising-life/shared-boat-ownership-all-the-fun-at-a-fraction-of-the-cost-100694?utm_source=chatgpt.com [dostęp z dnia 20.04.2025].
- [I.14] PRO AIR Sp. z o.o., Dokumentacja techniczna Jachtu 2020. Materiały wewnętrzne, PRO AIR, 2020, [dokument niepublikowany].

Załącznik 1

Z.1.A. Formularz badania eksperckiego ważności wskaźników cyrkularności jachtu pierwszej rundy

Szanowni Państwo,

w związku z przygotowywaniem rozprawy doktorskiej poświęconej zagadnieniom zastosowania koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym w kształtowaniu obiektów technicznych na przykładzie jachtów, proszę o udzielenie odpowiedzi na pytania zawarte w poniższym kwestionariuszu. Wyniki badania zostaną zastosowane w budowie modelu oceny cyrkularności, który zostanie zweryfikowany na przykładzie oceny wybranego jachtu.

Formularz badania eksperckiego ważności wskaźników cyrkularności jachtu		
Kwestionariusz 1 rundy badania prowadzonego metodą delficką		
Obszar specjalizacji eksperta:		
Odpowiedzi dotyczące istotności poszczególnych aspektów cyrkularności jachtów proszę formułować w procentach wskazując jedną z następujących wartości: 25%, 15%, 10%, 5%, 2,5%, 0%. Proszę o zwrócenie uwagi, aby suma istotności poszczególnych odpowiedzi wyniosła 100%.		
Pytania dotyczące wybranych aspektów cyrkularności jachtów	Propozycja istotności aspektów cyrkularności [%]	Uzasadnienie (opcjonalne)
Na ile istotne jest, aby jacht użytkowany był możliwie najbardziej intensywnie (żeglował jak najdłużej w każdym roku eksploatacji), zgodnie z postulatem maksymalizacji wykorzystania zasobów?		
Na ile istotne jest, aby w konstrukcji jachtu zapewniony był jak największy udział materiałów wtórnych?		
Na ile istotne jest, aby materiały zastosowane w budowie jachtu cechowały się jak najmniejszą uciążliwością środowiskową w perspektywie cyklu ich życia?		
Na ile istotne jest, aby masa jachtu była możliwie jak najmniejsza, zgodnie z postulatem optymalizacji zużycia surowców?		
Na ile istotne jest, aby w konstrukcji jachtu zapewniony był jak największy udział komponentów recykulowanych (pochodzących z innych używanych wcześniej jednostek pływających)?		
Na ile istotne jest, aby w jachcie użytych było możliwie najwięcej komponentów, które po zakończeniu		

eksploatacji jachtu będą mogły być zastosowane w innych jednostkach pływających?		
Na ile istotne jest, aby jacht był skonstruowany w sposób zapewniający mu największy potencjał do przywracania sprawności eksploatacyjnej w przypadku awarii (był zdalny do napraw)?		
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający mu największy potencjał do regeneracji (remanufacturingu), polegającej na przywróceniu pierwotnego stanu?		
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający największy potencjał do pełnienia innych funkcji (niż pierwotne) po przywróceniu sprawności użytkowej?		
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający mu największą zdolność do recyklingu?		
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający mu największą zdolność do utylizacji termicznej?		

Badanie prowadzone jest metodą delficką, stąd przewidziane są jego kolejne rundy, aby osiągnąć procent zgodności = 75%,

Dziękuję za podzielenie się wiedzą ekspercką i poświęcony czas.

Z.1.B. Formularz badania eksperckiego ważności wskaźników cyrkularności jachtu drugiej rundy

Szanowni Państwo,

dziękuję za udział w I rundzie badania prowadzonego w związku z przygotowaniem rozprawy doktorskiej poświęconej zagadnieniom zastosowania koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym w kształtowaniu obiektów technicznych na przykładzie jachtów. W związku z tym, że badanie jest realizowane metodą delficką, proszę o wypełnienie poniższej ankiety, w której wskazano wyniki I rundy (medianę i procent zgodności odpowiedzi). Celem drugiej rundy badania jest zbliżenie stanowisk ekspertów, stąd proszę o uwzględnienie wartości tych parametrów przy formułowaniu propozycji istotności aspektów cyrkularności.

Formularz badania eksperckiego ważności wskaźników cyrkularności jachtu			
Kwestionariusz 2 rundy badania prowadzonego metodą delficką			
Obszar specjalizacji eksperta:			
Odpowiedzi dotyczące istotności poszczególnych aspektów cyrkularności jachtów proszę formułować w procentach wskazując jedną z następujących wartości: 25%, 15%, 10%, 5%, 2,5%, 0%. Proszę o zwrócenie uwagi, aby suma istotności poszczególnych odpowiedzi wyniosła 100%.			
Pytania dotyczące wybranych aspektów cyrkularności jachtów	Wyniki I rundy		Propozycja istotności aspektów cyrkularności [%]
	Mediana	Zgodność odpowiedzi i ekspertów [%]	
Na ile istotne jest, aby jacht użytkowany był możliwie najbardziej intensywnie (żeglował jak najdłużej w każdym roku eksploatacji), zgodnie z postulatem maksymalizacji wykorzystania zasobów?	15 %	60	
Na ile istotne jest, aby w konstrukcji jachtu zapewniony był jak największy udział materiałów wtórnych?	5 %	60	
Na ile istotne jest, aby materiały zastosowane w budowie jachtu cechowały się jak najmniejszą uciążliwością środowiskową w perspektywie cyklu ich życia?	10 %	60	
Na ile istotne jest, aby masa jachtu była możliwie jak najmniejsza, zgodnie z postulatem optymalizacji zużycia surowców?	5 %	93	
Na ile istotne jest, aby w konstrukcji jachtu zapewniony był jak największy udział	5 %	60	

komponentów recykulowanych (pochodzących z innych używanych wcześniej jednostek pływających)?			
Na ile istotne jest, aby w jachcie użytych było możliwie najwięcej komponentów, które po zakończeniu eksploatacji jachtu będą mogły być zastosowane w innych jednostkach pływających?	5 %	80	
Na ile istotne jest, aby jacht był skonstruowany w sposób zapewniający mu największy potencjał do przywracania sprawności eksploatacyjnej w przypadku awarii (był zdalny do napraw)?	15 %	60	
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający mu największy potencjał do regeneracji (remanufacturingu), polegającej na przywróceniu pierwotnego stanu?	10 %	80	
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający największy potencjał do pełnienia innych funkcji (niż pierwotne) po przywróceniu sprawności użytkowej?	5 %	73	
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający mu największą zdolność do recyklingu?	10 %	60	
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający mu największą zdolność do utylizacji termicznej?	2,5 %	53	

Badanie prowadzone jest metodą delficką, stąd dopuszcza się jego kolejne rundy, aby osiągnąć procent zgodności minimum 75%.

Dziękuję za podzielenie się wiedzą ekspercką i poświęcony czas.

Z.1.C. Wyniki badania eksperckiego ważności wskaźników cyrkularności jachtu

Formularz wyników badania eksperckiego ważności wskaźników cyrkularności jachtu po rundzie 1 i 2				
Wyniki dotyczące wybranych aspektów cyrkularności jachtów	Wyniki I rundy		Wyniki II rundy	
	Mediana	Zgodność odpowiedzi ekspertów [%]	Mediana	Zgodność odpowiedzi ekspertów [%]
Na ile istotne jest, aby jacht użytkowany był możliwie najbardziej intensywnie (żeglował jak najdłużej w każdym roku eksploatacji), zgodnie z postulatem maksymalizacji wykorzystania zasobów?	15,00	60,00	15,00	86,67
Na ile istotne jest, aby w konstrukcji jachtu zapewniony był jak największy udział materiałów wtórnych?	5,00	60,00	10,00	86,67
Na ile istotne jest, aby materiały zastosowane w budowie jachtu cechowały się jak najmniejszą uciążliwością środowiskową w perspektywie cyklu ich życia?	10,00	60,00	15,00	93,33
Na ile istotne jest, aby masa jachtu była możliwie jak najmniejsza, zgodnie z postulatem optymalizacji zużycia surowców?	5,00	93,33	5,00	93,33
Na ile istotne jest, aby w konstrukcji jachtu zapewniony był jak największy udział komponentów recykulowanych (pochodzących z innych używanych wcześniej jednostek pływających)?	5,00	60,00	5,00	100,00
Na ile istotne jest, aby w jachcie użytych było możliwie najwięcej komponentów, które po zakończeniu eksploatacji jachtu będą mogły być zastosowane w innych jednostkach pływających?	10,00	80,00	10,00	100,00
Na ile istotne jest, aby jacht był skonstruowany w sposób zapewniający mu największy potencjał do przywracania sprawności	15,00	60,00	10,00	100,00

eksploatacyjnej w przypadku awarii (był zdalny do napraw)?				
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający mu największy potencjał do regeneracji (remanufacturingu), polegającej na przywróceniu pierwotnego stanu?	10,00	80,00	10,00	80,00
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający największy potencjał do pełnienia innych funkcji (niż pierwotne) po przywróceniu sprawności użytkowej?	10,00	66,67	5,00	80,00
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający mu największą zdolność do recyklingu?	10,00	60,00	10,00	86,67
Na ile istotne jest, aby jacht (lub jego komponenty) był skonstruowany w sposób zapewniający mu największą zdolność do utylizacji termicznej?	5,00	66,67	5,00	80,00

Załącznik 2

Z.2.A. Formularz badania eksperckiego podatności recyklingowej komponentów jachtowych

Szanowni Państwo,

w związku z przygotowywaniem rozprawy doktorskiej poświęconej zagadnieniom zastosowania koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym w kształtowaniu obiektów technicznych, proszę o zaproponowanie klas podatności recyklingowej wybranym komponentom typowym dla konstrukcji branży jachtowej. Wyniki badania będą zastosowane w analizach wybranych aspektów cyrkularności jachtów z wykorzystaniem opracowanego modelu oceny cyrkularności

Formularz badania eksperckiego podatności recyklingowej komponentów jachtowych		
Kwestionariusz 1 rundy badania prowadzonego metoda delficką		
Obszar specjalizacji eksperta:		
Klasy podatności recyklingowej: klasa I – komponenty nierecyklingowalne, klasa II – komponenty o niskiej zdolności do recyklingu, klasa III – komponenty umiarkowanie recyklingowalne, klasa IV – komponenty o wysokiej zdolności do recyklingu, klasa V – komponenty w pełni recyklingowalne		
Komponenty jachtowe, dla których proszę określić klasę podatności recyklingowej	Propozycja klasy podatności recyklingowej, do której przypisany powinien być komponent	Uzasadnienie (opcjonalne)
Kadłub laminatowy		
Kadłub stalowy		
Kadłub aluminiowy		
Kadłub drewniany		
Balast wykonany z ołowiu		
Balast ze stali lub żeliwa		
Balast kompozytowy		
Pokład laminatowy		
Pokład stalowy		
Pokład aluminiowy		
Pokład drewniany		
Nadbudówka laminatowa		
Nadbudówka stalowa		
Nadbudówka aluminiowa		
Nadbudówka drewniana		
Skajlajty ze szkła organicznego		
Elementy zabudowy wnętrza z laminatu		
Elementy zabudowy wnętrza ze stali		

Elementy zabudowy wnętrza z aluminium		
Elementy zabudowy wnętrza z drewna		
Omasztowanie ze stopów aluminium		
Omasztowanie stalowe		
Omasztowanie drewniane		
Omasztowanie z kompozytów		
Liny stalowe		
Liny z włókien syntetycznych		
Liny z włókien naturalnych		
Pręty i profile stalowe		
Pręty i profile ze stopów aluminium		
Żagle z poliestru		
Żagle z kevlaru		
Żagle z włókien węglowych		
Żagle z nylonu		
Żagle z włókien naturalnych		
Osprzęt pokładowy - elementy z laminatu		
Osprzęt pokładowy - elementy z drewna		
Osprzęt pokładowy - elementy z metalu		
Silnik (diesel lub benzynowy)		
Silnik elektryczny		
Przeniesienie napędu (przekładnia, wał, śruba itd.)		
Agregat prądotwórczy		
Akumulatory		
Instalacja wodno-kanalizacyjna		
Instalacja elektryczna		
Inst. hydrauliczna – elementy z metalu		
Inst. hydrauliczna – elementy z tworzyw		
Instalacja wentylacyjna		
Instalacja grzewcza i klimatyzacyjna		
Instalacja paliwowa		
Instalacja nawigacyjna i komunikacyjna		
Instalacja przeciwpożarowa		
Wyposażenie dot. bezpieczeństwa zbiorowego z laminatu (np. szalupy, obudowy tratw ratunkowych)		
Wyposażenie dot. bezpieczeństwa zbiorowego z tworzyw organicznych (np. ponton tratwy, namiot osłaniający)		

Badanie prowadzone jest metodą delficką, stąd przewidziane są jego kolejne rundy, aby osiągnąć procent zgodności = 75%,

Dziękuję za podzielenie się wiedzą ekspercką i poświęcony czas.

Z.2.B. Wyniki badania eksperckiego ważności wskaźników cyrkularności jachtu

Formularz wyników badania eksperckiego podatności recyklingowej komponentów jachtowych			
Wyniki uzyskane po I rundzie badania prowadzonego metodą delficką			
Komponenty jachtowe, dla których proszę określić klasę podatności recyklingowej	Wyniki klasy podatności recyklingowej, do której przypisany powinien być komponent		
	ŚREDNIA	MEDIANA	% zgodności
Kadłub laminatowy	2	2	87
Kadłub stalowy	5	5	80
Kadłub aluminiowy	5	5	80
Kadłub drewniany	3	3	80
Balast wykonany z ołowiu	4	4	80
Balast ze stali lub żeliwa	5	5	100
Balast kompozytowy	2	2	100
Pokład laminatowy	2	2	100
Pokład stalowy	5	5	93
Pokład aluminiowy	5	5	80
Pokład drewniany	3	3	80
Nadbudówka laminatowa	2	2	87
Nadbudówka stalowa	5	5	80
Nadbudówka aluminiowa	5	5	80
Nadbudówka drewniana	3	3	93
Skajłajty ze szkła organicznego	3	3	80
Elementy zabudowy wnętrza z laminatu	2	2	87
Elementy zabudowy wnętrza ze stali	5	5	93
Elementy zabudowy wnętrza z aluminium	5	5	93
Elementy zabudowy wnętrza z drewna	3	3	80
Omasztowanie ze stopów aluminium	5	5	100
Omasztowanie stalowe	5	5	93
Omasztowanie drewniane	3	3	100
Omasztowanie z kompozytów	2	2	93
Liny stalowe	5	5	93
Liny z włókien syntetycznych	4	4	100
Liny z włókien naturalnych	2	2	80
Pręty i profile stalowe	5	5	80
Pręty i profile ze stopów aluminium	5	5	80
Żagle z poliestru	3	3	80
Żagle z kevlaru	2	2	80

Żagle z włókien węglowych	2	2	87
Żagle z nylonu	2	3	93
Żagle z włókien naturalnych	2	2	87
Osprzęt pokładowy - elementy z laminatu	2	2	80
Osprzęt pokładowy - elementy z drewna	3	3	80
Osprzęt pokładowy - elementy z metalu	5	5	87
Silnik (diesel lub benzynowy)	4	4	100
Silnik elektryczny	4	4	80
Przeniesienie napędu (przekładnia, wał, śruba itd.)	5	5	93
Agregat prądotwórczy	4	4	80
Akumulatory	4	4	80
Instalacja wodno-kanalizacyjna	3	3	80
Instalacja elektryczna	3	3	93
Inst. hydrauliczna – elementy z metalu	4	4	80
Inst. hydrauliczna – elementy z tworzyw	3	3	93
Instalacja wentylacyjna	3	3	80
Instalacja grzewcza i klimatyzacyjna	3	3	80
Instalacja paliwowa	2	2	87
Instalacja nawigacyjna i komunikacyjna	4	4	80
Instalacja przeciwpożarowa	3	3	80
Wypożyczenie dot. bezpieczeństwa zbiorowego z laminatu (np. szalupy, obudowy tratw ratunkowych)	2	2	87
Wypożyczenie dot. bezpieczeństwa zbiorowego z tworzyw organicznych (np. ponton tratwy, namiot osłaniający)	3	3	80

Załącznik 3

Z.3.A. Formularz badania ankietowego założeń projektowych jachtu 2020

Szanowni Państwo,

W związku z przygotowywaniem rozprawy doktorskiej dotyczącej zastosowania koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym w kształtowaniu obiektów technicznych, proszę o wskazanie założeń projektowych przyjętych w pracach zespołu oraz ocenę możliwości wdrożenia tej koncepcji na przykładzie projektu Jacht 2020, w szczególności w odniesieniu do efektów optymalizacji konstrukcji (np. redukcji masy wybranych komponentów).

Wyniki badania zostaną wykorzystane w analizach wybranych aspektów cyrkularności jachtów z zastosowaniem opracowanego modelu oceny cyrkularności.

Formularz ankietowy badania założeń projektowych jachtu 2020						
Komponenty	kadłub	miec	omasztowanie	olinowanie	ożaglowanie	osprzęt
Założenia projektowe						
Jaką intensywność użytkowania jachtu założono (ile miesięcy w roku)? [miesiące]						
O ile udało się zredukować masę jachtu i jego komponentów w porównaniu z założeniami i pierwszym prototypem? [kg]						
Jaką trwałość założono w odniesieniu do jachtu i jego poszczególnych komponentów? [lata]						
O ile lat można wydłużyć trwałość przez stosowanie napraw? [lata] Uwaga - zero oznacza brak zdolności do napraw						
Ile lat mogą być eksploatowane komponenty pochodzące z używanego jachtu 2020 zamontowane w innym jachcie? [lata] Uwaga - zero oznacza brak możliwości zastosowania używanych komponentów jachtu 2020						
O ile lat można wydłużyć trwałość przez zastosowanie remanufakturingu? [lata] Uwaga - zero oznacza brak możliwości remanufakturingu						
Jak długo komponent jachtu może być stosowany do pełnienia innej funkcji? [lata] Uwaga - zero oznacza brak możliwości zastosowania w innym celu						
Prośba o wskazanie przykładu innego przeznaczenia niż funkcja komponentu przewidziana na jachcie 2020 - dot. pytania poprzedniego						

Czy założono, że któryś z komponentów jachtu 2020 może pochodzić z innej, używanej jednostki pływającej? [TAK=1 NIE=0]						

Z.3.B. Wyniki badania ankietowego założeń projektowych jachtu 2020

Wyniki badania ankietowego założeń projektowych jachtu 2020						
Założenia projektowe	Komponenty					
	kadłub	miecz	omasztowanie	olinowane	ożaglowanie	osprzęt
Jaką intensywność użytkowania jachtu założono (ile miesięcy w roku)? [miesiące]	6	6	6	6	6	6
O ile udało się zredukować masę jachtu i jego komponentów w porównaniu z założeniami i pierwszym prototypem? [kg]	0	30	0	0	0	0
Jaką trwałość założono w odniesieniu do jachtu i jego poszczególnych komponentów? [lata]	15	15	15	5	5	8
O ile lat można wydłużyć trwałość przez stosowanie napraw? [lata] Uwaga - zero oznacza brak zdolności do napraw	5	5	0	0	3	0
Ile lat mogą być eksploatowane komponenty pochodzące z używanego jachtu 2020 zamontowane w innym jachcie? [lata] Uwaga- zero oznacza brak możliwości zastosowania używanych komponentów jachtu 2020	7	7	5	0	0	5
O ile lat można wydłużyć trwałość przez zastosowanie remanufakturingu? [lata] Uwaga - zero oznacza brak możliwości remanufakturingu	10	10	5	0	0	0
Jak długo komponent jachtu może być stosowany do pełnienia innej funkcji? [lata] Uwaga - zero oznacza brak możliwości zastosowania w innym celu	5	5	10	5	2	5
Prośba o wskazanie przykładu innego przeznaczenia niż funkcja komponentu przewidziana na jachcie 2020 - dot. pytania poprzedniego*						
Czy założono, że któryś z komponentów jachtu 2020 może pochodzić z innej, używanej jednostki pływającej? [TAK=1 NIE=0]	0	0	1	1	0	1
*Przykłady innego przeznaczenia niż funkcja komponentu przewidziana na jachcie 2020 wskazane przez projektantów w badaniu ankietowym						
Komponent	Proponowane przeznaczenia					
kadłub	wannы przemysłowe, elementy małej architektury ogrodowej: ławki, huśtawki, oczka wodne					
miecz	akumulator ciepła w kominkach					

omasztowanie	elementy ogrodzenia: balustrady, barierki, słupy ogłoszeniowe, znaki drogowe
olinowanie	zabezpieczenia ładunków w logistyce
ożaglowanie	osłony przeciwsłoneczne, plandeki techniczne, oponcze do okrywania sprzętu
osprzęt	elementy infrastruktury portowej: wyciągarki na ślipie, boje cumownicze, elementy montażowe