

GOSPODARKA O OBIEGU ZAMKNIĘTYM (GOZ)

1. Wprowadzenie do gospodarki o obiegu zamkniętym

Gospodarka o obiegu zamkniętym, określana skrótem GOZ, jest koncepcją organizacji procesów gospodarczych, której podstawowym założeniem jest utrzymywanie wartości produktów, materiałów i zasobów w gospodarce możliwie długo, przy jednoczesnym ograniczaniu powstawania odpadów. W przeciwieństwie do klasycznego modelu liniowego, opisywanego często schematem „weź – wyprodukuj – zużyj – wyrzucić”, GOZ zakłada projektowanie procesów gospodarczych w taki sposób, aby materiały mogły wielokrotnie pełnić funkcję użytkową, a odpady były traktowane przede wszystkim jako potencjalne źródło surowców wtórnych. Nie oznacza to jednak, że każda forma odzysku jest automatycznie działaniem cyrkularnym. Kluczowe znaczenie ma zachowanie wartości materiału, energii i funkcji użytkowej oraz ograniczenie strat występujących w całym cyklu życia produktu.

W przekazanym materiale dydaktycznym istota GOZ została określona poprzez utrzymanie możliwie długo wysokiej wartości i jakości zasobów, materiałów i produktów oraz minimalizowanie ilości wytwarzanych odpadów. Podkreślono również trzy zasadnicze obszary: redukcję zużycia zasobów, zwiększenie ponownego wykorzystania zasobów oraz odzyskanie zasobów. Takie ujęcie jest szczególnie ważne, ponieważ sektor energetyczny nie funkcjonuje poza gospodarką materiałową. Instalacja fotowoltaiczna, turbina wiatrowa, pompa ciepła, magazyn energii czy biogazownia wymagają materiałów, komponentów, infrastruktury, transportu i serwisu, a po zakończeniu użytkowania generują strumień materiałów, które trzeba zagospodarować.

GOZ należy więc rozpatrywać nie jako synonim gospodarki odpadami, lecz jako szerszy model transformacji gospodarczej obejmujący projektowanie, dobór materiałów, produkcję, dystrybucję, użytkowanie, naprawę, modernizację, ponowne użycie, odzysk oraz zagospodarowanie pozostałości. Gospodarka odpadami jest jednym z elementów tego systemu, ale interwencja następująca dopiero po powstaniu odpadu jest z punktu widzenia hierarchii działań późniejsza niż zapobieganie jego powstaniu. W praktyce oznacza to przesunięcie punktu ciężkości z końca łańcucha na jego początek.

Znaczenie GOZ wynika również z ograniczoności zasobów naturalnych, rosnącego zapotrzebowania na materiały, presji klimatycznej, utraty różnorodności biologicznej oraz zależności gospodarek od globalnych łańcuchów dostaw. Jeżeli wzrost produkcji będzie nadal oparty głównie na zwiększaniu wydobycia pierwotnych surowców, system gospodarczy będzie generował presję środowiskową także wtedy, gdy część energii będzie pochodzić ze źródeł odnawialnych. Transformacja energetyczna i transformacja cyrkularna powinny zatem być traktowane jako procesy wzajemnie powiązane.

W 2015 r. Komisja Europejska przyjęła pierwszy plan działania dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym. Obejmował on działania odnoszące się do całego cyklu życia produktów – od produkcji i konsumpcji po gospodarkę odpadami oraz rynek surowców wtórnych. Obecna polityka UE rozwija tę koncepcję w kierunku bardziej zasobooszczędnej, konkurencyjnej i niskoemisyjnej gospodarki. Dla przyszłych inżynierów OZE oznacza to konieczność rozumienia nie tylko parametrów energetycznych urządzeń, lecz również ich materiałochłonności, trwałości, możliwości naprawy, modernizacji, ponownego użycia i recyklingu.

GOZ należy rozumieć jako model organizacji gospodarki, a nie pojedynczą technologię środowiskową. W ujęciu systemowym jego przedmiotem są przepływy materiałów, energii, produktów, komponentów i informacji pomiędzy przedsiębiorstwami, gospodarstwami domowymi, administracją i środowiskiem przyrodniczym. Celem jest utrzymanie wartości ekonomicznej i użytkowej produktów oraz materiałów możliwie długo, przy jednoczesnym ograniczeniu poboru zasobów pierwotnych i powstawania odpadów. W prezentacji wskazano trzy zasadnicze obszary GOZ: redukcję zużycia zasobów, zwiększenie ponownego wykorzystania oraz odzyskanie zasobów. Są to jednak elementy hierarchiczne: rozwiązanie, które zapobiega utracie materiału lub wydłuża życie produktu, jest co do zasady korzystniejsze niż rozwiązanie polegające wyłącznie na recyklingu po zakończeniu użytkowania.

Z punktu widzenia analizy naukowej GOZ można opisywać przez trzy komplementarne perspektywy. Pierwsza jest materiałowa i dotyczy przepływów masy oraz zamykania pętli surowcowych. Druga jest ekonomiczna i odnosi się do utrzymania wartości, produktywności zasobów oraz nowych modeli tworzenia wartości. Trzecia jest środowiskowa i obejmuje emisje, zużycie energii i wody, wpływ na klimat oraz ekosystemy. Dopiero jednoczesna analiza tych wymiarów pozwala ocenić, czy dane rozwiązanie rzeczywiście przybliża gospodarkę do cyrkularności. Sam fakt, że materiał został poddany recyklingowi, nie przesądza jeszcze o korzystnym bilansie środowiskowym; znaczenie mają m.in. straty materiałowe, zapotrzebowanie energetyczne procesu i możliwość zastąpienia surowca pierwotnego.

Dla sektora OZE szczególne znaczenie ma rozróżnienie między „odnawialnością” źródła energii a cyrkularnością technologii. Słońce, wiatr czy biomasa mogą być źródłami odnawialnymi, ale urządzenia służące do ich wykorzystania wymagają stali, aluminium, miedzi, szkła, tworzyw, materiałów półprzewodnikowych i komponentów elektronicznych. Dlatego instalacja OZE powinna być oceniana w całym cyklu życia: od wydobycia surowców i produkcji komponentów, przez transport i montaż, eksploatację oraz serwis, aż po demontaż i zagospodarowanie zużytych elementów. Takie podejście pozwala połączyć transformację energetyczną z transformacją zasobową.

2. Model liniowy a model cyrkularny

Model liniowy jest historycznie dominującym sposobem organizacji produkcji. W uproszczeniu polega on na pozyskaniu surowców, przetworzeniu ich w produkty, sprzedaży i użytkowaniu, a następnie skierowaniu zużytych produktów do systemu odpadowego. Model ten jest efektywny w warunkach dużej dostępności tanich surowców i energii, lecz jego ograniczeniem jest nieuwzględnianie pełnych kosztów środowiskowych oraz utrata wartości materiałów po zakończeniu użytkowania. W praktyce znaczna część materiału wchodzącego do gospodarki nie wraca do produkcji w postaci równoważnej jakościowo.

Model cyrkularny zmienia logikę systemu. Zamiast traktować odpad jako nieunikniony finał procesu, projektuje się produkty i procesy tak, aby kolejne cykle użytkowania były możliwe. Można mówić o dwóch współistniejących obiegach: biologicznym i technicznym. W obiegu biologicznym materiały pochodzenia biologicznego mogą, po odpowiednim wykorzystaniu, wracać do biosfery w sposób bezpieczny. W obiegu technicznym materiały takie jak metale, szkło, tworzywa czy komponenty techniczne powinny pozostawać w gospodarce poprzez utrzymanie, naprawę, ponowne użycie, regenerację, modernizację i recykling.

Istotna jest różnica między „zamknięciem obiegu” a zwykłym recyklingiem. Recykling jest jedną z metod utrzymania materiału w gospodarce, lecz często wiąże się ze stratą jakości lub energii. Dlatego z punktu widzenia hierarchii wartości korzystniejsze może być przedłużenie użytkowania całego produktu, ponowne użycie komponentu albo jego naprawa. W energetyce przykład stanowi wymiana pojedynczego elementu

instalacji zamiast demontażu całego urządzenia. W przypadku modułu fotowoltaicznego diagnostyka i wymiana wadliwego elementu mogą przedłużyć okres użytkowania, podczas gdy przedwczesny demontaż prowadzi do powstania odpadu i konieczności wykorzystania nowych materiałów do zastąpienia funkcjonującego wcześniej produktu.

W ujęciu systemowym GOZ wymaga zmiany relacji między producentem, użytkownikiem, serwisantem, przedsiębiorstwem odpadowym i recyklerem. Projektant powinien uwzględniać przyszły demontaż, przedsiębiorca powinien znać przepływy materiałowe, a użytkownik powinien mieć możliwość naprawy lub modernizacji produktu. W efekcie powstaje system, w którym informacja o materiale i produkcie jest równie ważna jak sam materiał. Z tego powodu rośnie znaczenie identyfikowalności, cyfrowych systemów ewidencji, danych o cyklu życia oraz cyfrowego paszportu produktu.

Dla energetyki odnawialnej model cyrkularny jest szczególnie istotny z powodu szybkiego wzrostu liczby instalacji. Rozwój fotowoltaiki, energetyki wiatrowej, pomp ciepła i magazynowania energii powoduje zwiększenie zapotrzebowania na stal, aluminium, miedź, szkło, tworzywa, materiały półprzewodnikowe, komponenty elektrochemiczne i inne materiały. Sama zamiana paliwa kopalnego na odnawialne źródło energii nie eliminuje więc problemu zasobowego. Konieczne jest projektowanie całego systemu energetycznego jako systemu niskoemisyjnego i zasobooszczędnego.

Model liniowy opiera się na jednokierunkowym przepływie: pozyskanie surowca – produkcja – dystrybucja – użytkowanie – usunięcie produktu. W takim układzie znaczna część wartości materialnej i energetycznej zostaje utracona po zakończeniu użytkowania. Model cyrkularny zmienia logikę systemu: produkt jest projektowany z uwzględnieniem kolejnych cykli użytkowania, a materiały powinny pozostawać w obiegu możliwie długo. Nie oznacza to dosłownego „zamknięcia” wszystkich przepływów. W praktyce część materiałów jest tracona, część ulega degradacji jakościowej, a część energii jest rozpraszana. GOZ jest więc raczej dążeniem do ograniczania strat niż idealnym systemem bez strat.

Kluczową różnicą jest miejsce podejmowania decyzji. W gospodarce liniowej decyzje projektowe często koncentrują się na funkcjonalności i kosztach produkcji, natomiast w GOZ projektowanie powinno uwzględniać również trwałość, naprawialność, możliwość modernizacji, demontażu, ponownego użycia komponentów oraz odzysku materiałów. Oznacza to zmianę kryteriów optymalizacji. Inżynier nie powinien pytać wyłącznie „ile kosztuje wytworzenie urządzenia?”, ale także „ile zasobów zużyje ono w całym cyklu życia, jak długo zachowa funkcję, jakie będą możliwości jego naprawy i co stanie się z materiałami po zakończeniu eksploatacji?”.

W energetyce różnica ta jest szczególnie widoczna w odniesieniu do infrastruktury o długim okresie użytkowania. Projektant farmy fotowoltaicznej lub instalacji magazynowania energii powinien brać pod uwagę nie tylko sprawność, ale również trwałość komponentów, dostępność części zamiennych, możliwość wymiany pojedynczych modułów, modernizację systemu sterowania oraz odzysk materiałów. Podejście cyrkularne przesuwają akcent z maksymalizacji sprzedaży nowych urządzeń na maksymalizację wartości usługi energetycznej przy ograniczeniu zużycia materiałów.

3. Zasoby naturalne, efektywność materiałowa i presja środowiskowa

Podstawą GOZ jest zrozumienie zależności pomiędzy gospodarką a zasobami naturalnymi. Każdy produkt jest materialnym zapisem energii i zasobów wykorzystanych na kolejnych etapach jego cyklu życia. Dotyczy to zarówno prostych produktów konsumpcyjnych, jak i zaawansowanych technologicznie

instalacji energetycznych. Analiza przepływu materiałów pozwala odpowiedzieć na pytania: jakie surowce zostały wykorzystane, skąd pochodzą, ile energii i wody zużyto podczas ich przetwarzania, jakie emisje powstały oraz co stanie się z produktem po zakończeniu eksploatacji.

W przekazanym materiale wskazano, że gospodarki wysokorozwinięte zużywają około 10 Mg surowców na osobę rocznie, a w przypadku gospodarki UE przywołano wartość około 16 Mg surowców na osobę, z czego około 6 Mg stanowią odpady. Dane te należy traktować jako wartości przywołane w materiale dydaktycznym, a nie jako aktualny jednolity wskaźnik wszystkich państw i wszystkich metod rachunku materiałowego. Ich znaczenie dydaktyczne polega na pokazaniu skali zależności pomiędzy konsumpcją a presją materiałową.

W analizie GOZ ważna jest produktywność zasobów, czyli relacja wartości ekonomicznej wytworzonej w gospodarce do ilości zużytych materiałów. Wzrost produktywności zasobów może być osiągany poprzez efektywniejsze procesy, zmianę materiałów, ograniczenie strat produkcyjnych, wydłużenie trwałości produktów, zwiększenie wykorzystania surowców wtórnych oraz przejście od sprzedaży produktów do świadczenia usług. Jednak wzrost efektywności nie zawsze prowadzi automatycznie do spadku zużycia zasobów. Może wystąpić efekt odbicia, w którym obniżenie kosztu jednostkowego użytkowania produktu zwiększa jego całkowite wykorzystanie.

Dla OZE szczególnie ważne jest rozróżnienie efektywności energetycznej od efektywności materiałowej. Instalacja może mieć bardzo dobre parametry energetyczne, a jednocześnie wymagać znacznych ilości materiałów i generować trudne do zagospodarowania odpady po okresie użytkowania. Ocena powinna zatem obejmować zarówno produkcję energii, jak i cały cykl życia urządzenia. Przydatnym narzędziem jest analiza cyklu życia LCA, która pozwala ocenić potencjalne oddziaływania środowiskowe od pozyskania surowców poprzez produkcję i użytkowanie po koniec życia.

W praktyce inżynierskiej oznacza to konieczność projektowania instalacji z uwzględnieniem trwałości, możliwości naprawy i dostępności części zamiennych. Należy analizować, czy wymiana komponentu jest technicznie i ekonomicznie możliwa, czy urządzenie może być modernizowane oraz czy po demontażu materiały można łatwo rozdzielić. Wymagania te są coraz bardziej istotne wraz z rozwojem regulacji dotyczących ekoprojektowania i informacji o produktach.

Zasoby naturalne obejmują m.in. surowce mineralne, energetyczne, wodę, glebę oraz zasoby biologiczne. Prezentacja wskazuje na ścisłe powiązanie cyklu życia produktu z zasobami energii, minerałów, gleby i wody. W analizie GOZ istotne jest zatem odejście od traktowania materiału jako wielkości bezpośrednio dostępnej i uwzględnienie całego łańcucha jego pozyskania. Wydobycie, wzbogacanie, przetwarzanie i transport surowców generują zużycie energii, emisje i presję na środowisko. Efektywność materiałowa oznacza osiąganie określonej funkcji przy mniejszym wykorzystaniu materiału lub przy większym wykorzystaniu tego samego materiału w kolejnych cyklach.

Ważnym pojęciem jest produktywność zasobów, która opisuje relację efektu gospodarczego do ilości wykorzystanych zasobów. Jednak sam wzrost produktywności nie gwarantuje spadku całkowitego zużycia zasobów. Jeżeli poprawa efektywności prowadzi do obniżenia kosztów i zwiększenia popytu, może wystąpić efekt odbicia. Dlatego ocena GOZ powinna obejmować zarówno wskaźniki intensywności, jak i całkowite przepływy materiałowe. W praktyce oznacza to konieczność łączenia analizy technicznej, ekonomicznej i środowiskowej.

W przypadku OZE problem zasobowy jest szczególnie ważny ze względu na rozwój technologii wykorzystujących metale i materiały krytyczne. Wzrost mocy instalacji fotowoltaicznych, wiatrowych i magazynów energii zwiększa zapotrzebowanie na surowce. Strategia cyrkularna powinna więc obejmować redukcję materiałochłonności, projektowanie pod kątem demontażu, rozwój rynków surowców wtórnych, odzysk metali oraz rozwój modeli ponownego wykorzystania komponentów. Dzięki temu transformacja energetyczna może jednocześnie zwiększać bezpieczeństwo surowcowe.

4. Cykl życia produktu i ekoprojektowanie

Koncepcja cyklu życia jest jednym z najważniejszych narzędzi myślenia cyrkularnego. Produkt nie rozpoczyna swojego istnienia w momencie zakupu przez konsumenta. Jego cykl obejmuje wydobywanie lub pozyskanie surowców, przetwarzanie materiałów, produkcję komponentów, montaż, transport, dystrybucję, użytkowanie, serwis i koniec życia. Każdy etap może generować zużycie energii, wody i materiałów oraz emisje i odpady. W GOZ analiza tych etapów służy znalezieniu miejsc, w których można ograniczyć straty.

Ekoprojektowanie oznacza włączanie kryteriów środowiskowych do procesu projektowania produktu. W praktyce obejmuje między innymi redukcję ilości materiałów, wybór materiałów o mniejszym wpływie środowiskowym, zwiększenie trwałości, projektowanie pod kątem naprawy, demontażu, modernizacji i recyklingu oraz ograniczenie stosowania substancji utrudniających odzysk. Dla produktów energetycznych ważne jest także projektowanie z myślą o bezpiecznej wymianie komponentów i możliwościach aktualizacji systemów sterowania.

W przypadku instalacji fotowoltaicznej ekoprojektowanie może obejmować dobór ram i konstrukcji umożliwiających demontaż, ograniczenie liczby rodzajów materiałów, poprawę dostępności komponentów, standaryzację połączeń oraz zapewnienie informacji o składzie materiałowym. W przypadku turbin wiatrowych istotne są m.in. konstrukcja wieży, możliwość odzysku stali i metali nieżelaznych oraz zagospodarowanie elementów kompozytowych. W przypadku magazynów energii istotna staje się konstrukcja modułowa, diagnostyka stanu ogniów, możliwość wymiany pojedynczych modułów i bezpieczne postępowanie z materiałami po zakończeniu eksploatacji.

Ekoprojektowanie wymaga współpracy inżynierów różnych specjalności. Projektant urządzenia musi współpracować z technologiem, specjalistą ds. materiałów, energetykiem, serwisantem i specjalistą ds. środowiska. Celem nie jest wyłączenie minimalizacja jednego parametru, lecz znalezienie rozwiązania optymalnego w całym cyklu życia. Przykładowo zmniejszenie masy urządzenia może obniżyć zużycie materiałów i energii transportu, ale jeżeli spowoduje spadek trwałości, może zwiększyć całkowite oddziaływanie poprzez konieczność wcześniejszej wymiany.

Współczesne podejście do ekoprojektowania coraz częściej łączy się z cyfryzacją. Informacja o składzie, pochodzeniu, sposobie naprawy, historii użytkowania i możliwości recyklingu może być przechowywana i przekazywana w formie cyfrowej. Cyfrowy paszport produktu jest jednym z kierunków rozwoju polityki produktowej UE. Dla sektora OZE może on ułatwiać przyszły demontaż instalacji i kwalifikację komponentów do ponownego użycia, regeneracji lub recyklingu.

Analiza cyklu życia produktu obejmuje wszystkie istotne etapy jego istnienia: pozyskanie surowców, przetwarzanie, projektowanie, produkcję, transport, użytkowanie, konserwację, naprawę, modernizację oraz postępowanie z produktem po zakończeniu jego funkcji. W prezentacji cykl życia przedstawiono jako podstawę rozumienia GOZ. Jest to fundamentalne założenie: oddziaływania środowiskowe nie powinny

być analizowane wyłącznie w miejscu wytworzenia odpadu, ponieważ znaczna część potencjalnych oddziaływań została już „zapisana” w materiale i produkcie.

Ekoprojektowanie oznacza uwzględnianie kryteriów środowiskowych już na etapie projektowania. Dla GOZ szczególnie ważne są: trwałość, możliwość naprawy, modułowość, możliwość modernizacji, łatwy demontaż, ograniczenie liczby różnych materiałów trudnych do rozdzielenia, dostępność części zamiennych oraz możliwość ponownego wykorzystania komponentów. W przypadku urządzeń energetycznych dochodzi również możliwość modernizacji elektroniki i systemów sterowania bez wymiany całego urządzenia. Projektant decyduje zatem w znacznym stopniu o przyszłych kosztach eksploatacji i zagospodarowania odpadu.

Ocena cyklu życia (LCA) dostarcza narzędzi do ilościowej oceny wpływu środowiskowego. Nie należy jednak utożsamiać LCA z GOZ. LCA jest metodą oceny oddziaływań w cyklu życia, natomiast GOZ jest koncepcją organizacji gospodarki. LCA może pomóc porównać rozwiązania cyrkularne i liniowe oraz wykryć sytuacje, w których pozornie cyrkularne rozwiązanie przenosi obciążenia środowiskowe z jednego etapu na inny. Dla inżyniera OZE jest to szczególnie istotne przy porównywaniu technologii i scenariuszy końca życia.

5. Hierarchia postępowania z odpadami i znaczenie prewencji

GOZ nie może być utożsamiany z maksymalizacją recyklingu. Właściwe podejście rozpoczyna się od zapobiegania powstawaniu odpadów. Następnie znaczenie ma przygotowanie do ponownego użycia, recykling, inne procesy odzysku, w tym odzysk energii, a dopiero na końcu unieszkodliwianie. Hierarchia ta wskazuje preferowaną kolejność działań, ponieważ im wcześniej interweniujemy w cyklu życia, tym więcej wartości produktu możemy zachować.

Zapobieganie powstawaniu odpadów oznacza przede wszystkim zmianę sposobu projektowania i użytkowania produktów. Może polegać na zwiększeniu trwałości, ograniczeniu opakowań, zmniejszeniu strat produkcyjnych, poprawie jakości procesów, naprawie zamiast wymiany oraz zmianie modeli biznesowych. W energetyce zapobieganie powstawaniu odpadu może oznaczać modernizację falownika, wymianę pojedynczego modułu baterii czy naprawę elementu mechanicznego turbiny zamiast demontażu całego urządzenia.

Ponowne użycie ma znaczenie szczególnie wtedy, gdy produkt lub jego komponent zachowuje funkcję użytkową. Przygotowanie do ponownego użycia obejmuje działania takie jak kontrola, czyszczenie, naprawa i przygotowanie produktu do ponownego zastosowania. Regeneracja może prowadzić do przywrócenia parametrów użytkowych komponentu, często przy znacznie mniejszym zużyciu materiałów niż w przypadku produkcji nowego elementu.

Recykling polega na przetworzeniu odpadu w produkt, materiał lub substancję, pierwotnie lub w innym celu. Wysokiej jakości recykling wymaga czystych i odpowiednio zebranych strumieni. Dlatego segregacja u źródła i systemy selektywnego zbierania są ważnym elementem infrastruktury GOZ. W przekazanym materiale podkreślono znaczenie BDO jako cyfrowej ewidencji i kontroli przepływu odpadów oraz rolę PSZOK-ów w systemie gospodarowania odpadami komunalnymi.

Odzysk energii zajmuje niższą pozycję w hierarchii niż ponowne użycie i recykling, ponieważ materiał zostaje przekształcony w energię i traci możliwość dalszego wykorzystania w tej samej postaci. Nie oznacza

to, że odzysk energii jest zawsze rozwiązaniem niewłaściwym. Może być uzasadniony dla frakcji, których nie można racjonalnie poddać recyklingowi, pod warunkiem spełnienia wymagań środowiskowych i prawnych. Ważne jest jednak rozróżnienie pomiędzy odzyskiem energii z odpadu a cyrkularnym utrzymaniem materiału w gospodarce.

Hierarchia postępowania z odpadami porządkuje działania według preferencji środowiskowej. Najwyżej znajduje się zapobieganie powstawaniu odpadów, następnie przygotowanie do ponownego użycia, recykling, inne procesy odzysku, a na końcu unieszkodliwianie. Z perspektywy GOZ hierarchia ta ma znaczenie strategiczne, ponieważ wskazuje, że najlepszym odpadem jest taki, który w ogóle nie powstał. Recykling jest ważnym elementem gospodarki cyrkularnej, ale nie powinien przesłaniać wcześniejszych możliwości zachowania produktu i jego funkcji.

Zapobieganie powstawaniu odpadów może być realizowane poprzez redukcję materiałochłonności, wydłużanie trwałości, naprawę, współdzielenie, ponowne użycie oraz odpowiednie projektowanie. W sektorze OZE może oznaczać np. wymianę pojedynczego komponentu zamiast całego urządzenia, regenerację elementów, wykorzystanie części zamiennych oraz projektowanie instalacji umożliwiających etapową modernizację. Takie rozwiązania ograniczają zarówno strumień odpadów, jak i zapotrzebowanie na nowe surowce.

Należy również rozróżnić odzysk materiałowy od odzysku energii. Jeżeli materiał zostaje spalony, jego energia może zostać wykorzystana, ale struktura materiałowa zostaje w dużej mierze utracona. W modelu GOZ preferowane są działania, które pozwalają zachować najwyższą wartość materiału lub produktu. Dlatego decyzje dotyczące zagospodarowania odpadu powinny być podejmowane zgodnie z hierarchią, z uwzględnieniem właściwości technicznych materiału i realnych możliwości odzysku.

6. GOZ a gospodarka odpadami w Polsce

Polska transformacja w kierunku GOZ obejmuje działania legislacyjne, organizacyjne, technologiczne i edukacyjne. W 2019 r. Rada Ministrów przyjęła „Mapę drogową transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym”. Dokument wskazał m.in. zrównoważoną produkcję przemysłową, zrównoważoną konsumpcję, biogospodarkę, nowe modele biznesowe oraz wdrażanie, monitorowanie i finansowanie GOZ jako główne obszary działania.

W gospodarce odpadami znaczenie ma rozwój infrastruktury zbierania i przetwarzania, poprawa jakości selektywnej zbiórki, ograniczanie składowania oraz rozwój rynku surowców wtórnych. Ważnym elementem systemu jest BDO, czyli baza danych o produktach i opakowaniach oraz o gospodarce odpadami, służąca m.in. ewidencji i kontroli przepływu odpadów. Cyfryzacja ewidencji jest istotna z perspektywy GOZ, ponieważ umożliwia zwiększenie przejrzystości przepływów materiałowych.

W przekazanym wykładzie zwrócono uwagę na wdrażanie BAT w instalacjach mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów, zmiany regulacyjne dotyczące instalacji komunalnych, spalarni i PSZOK-ów oraz rozwój systemu kaucyjnego. Te elementy należy postrzegać jako część szerszego systemu zarządzania materiałami i odpadami.

Od 1 października 2025 r. w Polsce funkcjonuje system kaucyjny. Obejmuje on określone opakowania po napojach. Zgodnie z informacją Ministerstwa Klimatu i Środowiska system obejmuje plastikowe butelki do 3 litrów i puszki do 1 litra z kaucją 0,50 zł oraz szklane butelki wielokrotnego użytku do 1,5 litra z kaucją

1 zł. Zwrot kaucji jest możliwy w punktach zbiórki bez konieczności przedstawiania paragonu. System ma zwiększać poziom zbiórki i recyklingu opakowań oraz ograniczać ich przedostawanie się do środowiska.

System kaucyjny jest przykładem instrumentu ekonomicznego, który wykorzystuje bodziec finansowy do zmiany zachowania użytkownika. Kaucja nie jest zwykłą opłatą za produkt – jest zwracana po oddaniu opakowania objętego systemem. W ten sposób wartość pieniężna zostaje powiązana z fizycznym zwrotem materiału. Jest to dobry przykład tego, że GOZ wymaga nie tylko technologii, lecz także odpowiednich mechanizmów organizacyjnych i ekonomicznych.

Rozszerzona Odpowiedzialność Producenta, ROP, jest kolejnym ważnym instrumentem. Jej istotą jest przeniesienie odpowiedzialności finansowej albo finansowej i organizacyjnej za etap cyklu życia produktu, gdy staje się on odpadem, na podmiot wprowadzający produkt. ROP może tworzyć bodźce do ekoprojektowania, ponieważ koszty zagospodarowania odpadu stają się elementem ekonomicznej oceny produktu.

Prezentacja pokazuje, że polska transformacja w kierunku GOZ jest powiązana z rozwojem systemu gospodarowania odpadami, cyfryzacją ewidencji, wymaganiami technicznymi instalacji oraz systemami zbierania. Należy jednak podkreślić, że GOZ jest szersza niż gospodarka odpadami. Gospodarka odpadami reaguje na powstały strumień odpadowy, natomiast GOZ ma wpływać również na to, czy i w jakiej ilości odpad powstanie. Ta różnica ma zasadnicze znaczenie dla oceny skuteczności polityki publicznej.

Jednym z elementów infrastruktury jest BDO, czyli system wspierający ewidencję i kontrolę przepływu odpadów. Z punktu widzenia zarządzania materiałami cyfrowa identyfikowalność przepływów ma coraz większe znaczenie. Pozwala analizować źródła powstawania odpadów, ich rodzaje, masę i kierunki zagospodarowania. W przyszłości podobną funkcję na poziomie produktów może pełnić cyfrowy paszport produktu, wspierający dostęp do informacji o składzie, trwałości, naprawie i możliwości recyklingu.

Polska Mapa drogowa transformacji w kierunku GOZ została przyjęta przez Radę Ministrów 10 września 2019 r. i wskazała m.in. zrównoważoną produkcję przemysłową, zrównoważoną konsumpcję, biogospodarkę oraz nowe modele biznesowe jako obszary priorytetowe. Współczesna interpretacja tych kierunków wymaga uzupełnienia o odporność łańcuchów dostaw, cyfryzację, surowce krytyczne i integrację polityki klimatycznej z polityką zasobową.

7. Zrównoważona konsumpcja i rola użytkownika

Transformacja cyrkularna nie jest możliwa wyłącznie dzięki działaniom przemysłu. Użytkownik wpływa na popyt, sposób użytkowania produktów, naprawę, ponowne wykorzystanie i sposób zagospodarowania odpadów. Zrównoważona konsumpcja oznacza świadome i odpowiedzialne korzystanie z zasobów oraz dóbr i usług, z uwzględnieniem konsekwencji środowiskowych i społecznych.

W przekazanym materiale zrównoważoną konsumpcję powiązano z ograniczeniem marnotrawstwa, produkcji odpadów i zanieczyszczeń oraz wyborem dóbr i usług spełniających kryteria etyczne, społeczne i środowiskowe. W praktyce ważne jest nie tylko to, co kupujemy, lecz także jak długo i jak intensywnie korzystamy z produktu. Produkt o wysokiej trwałości, który jest używany przez długi czas, może mieć korzystniejszy bilans zasobowy niż produkt tańszy, lecz często wymieniany.

W badaniu przedstawionym w materiałach źródłowych analizowano wiedzę konsumentów i studentów na temat GOZ. W badaniu konsumentów przeprowadzonym metodą CATI w okresie marzec–maj 2021 r.

uczestniczyło 1000 respondentów. Wśród pojęć ocenianych przez respondentów „gospodarka o obiegu zamkniętym” była poprawnie rozpoznawana przez około 40,2% badanych, podczas gdy segregacja odpadów przez około 95,7%, a recykling przez około 91,4%. Wynik ten pokazuje różnicę między znajomością pojedynczych praktyk odpadowych a rozumieniem całej koncepcji GOZ.

W tym samym materiale wskazano, że około 82,2% respondentów deklaroowało segregowanie odpadów w gospodarstwie domowym. Wśród przyczyn niesegregowania wymieniano m.in. brak motywacji, brak miejsca, brak odpowiednich pojemników oraz brak wiary w ponowne wykorzystanie odpadów. Są to przykłady barier behawioralnych i infrastrukturalnych. Sama informacja o potrzebie segregacji nie wystarcza, jeżeli system odbioru jest nieczytelny lub niedostępny.

Z punktu widzenia energetyki istotne są zachowania związane z efektywnością energetyczną i OZE. Materiał źródłowy wskazuje m.in. na używanie energooszczędnego sprzętu, wyłączanie oświetlenia i urządzeń oraz korzystanie z OZE. Należy jednak podkreślić, że cyrkularność nie oznacza wyłącznie „kupowania ekologicznych urządzeń”. Obejmuje także wydłużanie ich życia, naprawę, modernizację, właściwe użytkowanie i odpowiedzialne postępowanie po zakończeniu eksploatacji.

Zrównoważona konsumpcja w prezentacji została zdefiniowana jako optymalne, świadome i odpowiedzialne korzystanie z zasobów, dóbr i usług zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. W GOZ konsument nie jest wyłącznie odbiorcą gotowego produktu. Jego decyzje wpływają na popyt na produkty trwałe, naprawialne, używane, współdzielone i efektywne zasobowo. Konsument może również decydować o długości życia produktu poprzez sposób użytkowania, konserwację i naprawę.

Ważnym problemem jest rozbieżność pomiędzy deklarowanymi postawami a rzeczywistym zachowaniem. Materiał prezentacyjny zawiera wyniki badań konsumentów i studentów, pokazujące zróżnicowany poziom znajomości pojęć GOZ, segregacji, recyklingu, OZE i efektywności energetycznej. Dane te należy interpretować ostrożnie, ponieważ badania pochodzą z określonych okresów i prób badawczych. Ich wartość dydaktyczna polega jednak na pokazaniu, że sama dostępność infrastruktury nie gwarantuje zmiany zachowań.

W praktyce GOZ konsument może realizować poprzez ograniczanie zbędnych zakupów, wybór produktów trwałych, naprawę, zakup rzeczy używanych, współdzielenie oraz prawidłową segregację. W odniesieniu do energii znaczenie ma wybór urządzeń o wysokiej efektywności, ograniczanie zużycia energii i wykorzystywanie OZE. Zachowania te tworzą popyt na rozwiązania cyrkularne i mogą wpływać na przedsiębiorstwa poprzez mechanizm rynkowy.

8. Logistyka odzysku, PSZOK i systemy zbierania

Logistyka odzysku jest odpowiedzią na potrzebę organizowania przepływu produktów, opakowań i materiałów w kierunku przeciwnym do tradycyjnego łańcucha dostaw. W modelu liniowym główny przepływ przebiega od producenta przez dystrybutora do użytkownika. W GOZ pojawia się dodatkowy przepływ zwrotny: zużyty produkt lub komponent musi zostać odebrany, zidentyfikowany, sklasyfikowany i skierowany do odpowiedniego procesu.

Skuteczność logistyki odzysku zależy od jakości zbiórki, dostępności punktów odbioru, kosztów transportu, wartości materiału oraz informacji o stanie produktu. Wysoka wartość ekonomiczna materiału może

uzasadniać rozwój systemu odbioru, natomiast materiały o niskiej wartości wymagają bardziej efektywnych systemów zbiórki lub regulacyjnych bodźców.

PSZOK, czyli Punkt Selektywnego Zbierania Odpadów Komunalnych, pełni istotną funkcję w systemie odpadów komunalnych. Umożliwia mieszkańcom przekazywanie określonych strumieni odpadów, które nie powinny trafiać do standardowego pojemnika. W ujęciu GOZ PSZOK jest elementem infrastruktury umożliwiającej skierowanie materiałów do właściwych procesów zagospodarowania.

W przypadku technologii energetycznych logistyka odzysku będzie nabierała znaczenia wraz ze wzrostem liczby instalacji, które w kolejnych latach osiągną koniec okresu eksploatacji. Dotyczy to modułów PV, falowników, kabli, konstrukcji aluminiowych, baterii, elementów turbin, pomp ciepła i urządzeń sterujących. Wiele z tych materiałów ma wysoką wartość techniczną, dlatego niewłaściwe zagospodarowanie oznacza nie tylko problem środowiskowy, ale również utratę wartości ekonomicznej.

Projektowanie logistyki odzysku powinno być elementem projektowania produktu. Jeżeli produkt jest trudny do demontażu, nie posiada informacji o składzie i wymaga specjalistycznego transportu, koszt zamknięcia obiegu wzrasta. Jeżeli natomiast komponenty są oznaczone, modułowe i łatwo rozdzielalne, zwiększa się możliwość ponownego użycia i recyklingu.

Logistyka odzysku obejmuje organizację przepływów produktów, opakowań, komponentów i materiałów w kierunku od użytkownika do punktów zbierania, sortowania, naprawy, regeneracji, demontażu lub recyklingu. Jest przeciwieństwem jednokierunkowego przepływu charakterystycznego dla klasycznej dystrybucji. W GOZ logistyka zwrotna staje się integralną częścią projektowania łańcucha dostaw. Jej efektywność zależy od kosztów transportu, gęstości punktów zbierania, jakości segregacji i wartości odzyskiwanych materiałów.

PSZOK, czyli punkt selektywnego zbierania odpadów komunalnych, jest elementem infrastruktury umożliwiającej kierowanie określonych strumieni odpadów do właściwego zagospodarowania. Dla GOZ znaczenie PSZOK wykracza poza samo przyjmowanie odpadów. Jakość organizacji zbierania decyduje o czystości strumienia materiałowego, a więc o możliwościach późniejszego odzysku. Zanieczyszczony materiał może wymagać dodatkowego przetwarzania albo zostać zdegradowany do mniej wartościowego zastosowania.

W sektorze OZE logistyka zwrotna będzie zyskiwała znaczenie wraz ze wzrostem liczby zużytych modułów, falowników, akumulatorów, przewodów, elementów konstrukcyjnych i urządzeń sterujących. Projektowanie systemu odzysku powinno uwzględniać lokalizację instalacji, masę komponentów, możliwość bezpiecznego transportu, identyfikację materiałów i potencjalne kanały ponownego wykorzystania. Jest to przykład problemu, w którym wiedza inżynierska i logistyczna muszą być stosowane łącznie.

9. Biogospodarka i biologiczny obieg GOZ

Biogospodarka stanowi jeden z priorytetowych obszarów wskazanych w polskiej Mapie drogowej GOZ. Obejmuje gospodarowanie zasobami biologicznymi w sposób umożliwiający ich zrównoważone wykorzystanie i tworzenie wartości ekonomicznej przy zachowaniu zdolności ekosystemów do regeneracji. W sektorze OZE biogospodarka ma szczególne znaczenie, ponieważ biomasa, biogaz i biometan łączą zagadnienia energetyczne, rolnicze i odpadowe.

Biomasa może być traktowana jako element cyklu biologicznego, ale nie każda forma spalania biomasy jest automatycznie rozwiązaniem cyrkularnym. Kluczowe jest pochodzenie surowca, sposób jego pozyskania, konkurencja z produkcją żywności, wpływ na glebę i bioróżnorodność oraz możliwość wykorzystania pozostałości po procesie. W przypadku biogazowni rolniczej szczególnie interesujące jest wykorzystanie substratów odpadowych i produktów ubocznych, które w innym przypadku mogłyby stanowić obciążenie środowiskowe.

Produkcja biogazu może prowadzić do odzysku energii chemicznej zawartej w substancji organicznej. Jednocześnie powstaje poferment, którego sposób wykorzystania powinien być oceniany pod względem jakości i bezpieczeństwa. Z perspektywy GOZ istotne jest, aby proces nie kończył się na produkcji energii, lecz uwzględnił dalsze zagospodarowanie strumieni materiałowych.

Biogospodarka jest również związana z wykorzystaniem biomateriałów, produktów ubocznych rolnictwa, odpadów przemysłu spożywczego i osadów. Ważne jest jednak zachowanie hierarchii wartości. Jeżeli materiał może być wykorzystany jako produkt lub surowiec o wyższej wartości, jego bezpośrednie spalanie może być mniej korzystne niż inne zastosowanie. Właśnie dlatego ocena ścieżki zagospodarowania powinna uwzględniać analizę techniczną, ekonomiczną i środowiskową.

Biogospodarka stanowi jeden z priorytetów wskazanych w polskiej Mapie drogowej GOZ. Obejmuje gospodarowanie zasobami biologicznymi i procesami wykorzystującymi biomasę w sposób uwzględniający jej odnawialność, ograniczenia środowiskowe i możliwości regeneracji. W odróżnieniu od technicznego obiegu materiałów, obieg biologiczny jest silnie związany z procesami przyrodniczymi. Nie oznacza to jednak, że każda biomasa jest automatycznie zasobem zrównoważonym.

W sektorze energetycznym szczególne znaczenie mają biogazownie, biometan, wykorzystanie pozostałości rolniczych, bioodpady i produkty uboczne przemysłu rolno-spożywczego. Właściwie zaprojektowany system może łączyć produkcję energii z zagospodarowaniem strumieni odpadowych. Przykładowo substrat organiczny może zostać przekształcony w biogaz, a pozostałość po procesie może być zagospodarowana jako nawóz, o ile spełnia wymagania jakościowe i środowiskowe.

Ocena cyrkularności biogospodarki wymaga jednak analizy konkurencji o zasoby, transportu biomasy, bilansu składników pokarmowych, emisji oraz wpływu na glebę i bioróżnorodność. Kluczowa jest zasada kaskadowego wykorzystania biomasy: tam, gdzie jest to możliwe, warto najpierw wykorzystać materiał do celów o wyższej wartości, a dopiero pozostałości przeznaczać do odzysku energetycznego. W ten sposób energia z biomasy może być elementem szerszego systemu gospodarowania zasobami.

10. GOZ w sektorze odnawialnych źródeł energii

Sektor OZE jest jednocześnie beneficjentem i wyzwaniem dla GOZ. Rozwój źródeł odnawialnych ogranicza zużycie paliw kopalnych i związane z nim emisje, ale wymaga dużej ilości infrastruktury materialnej. Wraz ze wzrostem mocy zainstalowanej rośnie znaczenie dostępności surowców, odporności łańcuchów dostaw i zagospodarowania zużytych urządzeń.

Fotowoltaika jest dobrym przykładem technologii, dla której należy analizować cały cykl życia. Moduł składa się m.in. ze szkła, ramy metalowej, ogniw, przewodów, materiałów enkapsulacyjnych i elementów elektronicznych. Po zakończeniu eksploatacji powstaje mieszanina materiałów o różnej wartości i

podatności na odzysk. Najbardziej pożądanym kierunkiem jest wydłużanie okresu użytkowania oraz ponowne wykorzystanie sprawnych modułów, a następnie odzysk materiałów.

W energetyce wiatrowej dominują materiały takie jak stal, beton, miedź i aluminium, ale trudniejszym strumieniem mogą być kompozytowe łopaty wirników. Projektowanie pod kątem demontażu i odzysku jest więc szczególnie ważne. W przypadku konstrukcji stalowych potencjał odzysku jest wysoki, natomiast kompozyty wymagają wyspecjalizowanych technologii. Z perspektywy inżynierskiej oznacza to konieczność uwzględniania końca życia już na etapie wyboru technologii.

Pompy ciepła i urządzenia chłodnicze wymagają uwzględnienia zarówno materiałów, jak i czynników roboczych. Prawidłowe odzyskiwanie i zagospodarowanie substancji roboczych jest elementem bezpieczeństwa środowiskowego. Z kolei magazyny energii są szczególnym przypadkiem ze względu na wartość materiałów elektrochemicznych i ryzyko związane z niewłaściwym postępowaniem z bateriami. W przyszłości znaczenie będzie miała diagnostyka stanu baterii, która umożliwi kwalifikowanie zużytych modułów do dalszych zastosowań, regeneracji lub recyklingu.

Cyrkularny sektor OZE powinien więc opierać się na kilku zasadach: projektowaniu trwałych urządzeń, utrzymaniu i naprawie, modernizacji, standaryzacji komponentów, zapewnieniu części zamiennych, monitorowaniu stanu technicznego, planowaniu demontażu, odzysku materiałów i odpowiedzialności producenta. Dopiero połączenie tych elementów pozwala mówić o kompleksowej cyrkularności technologii energetycznych.

Technologie OZE są jednym z filarów dekarbonizacji, ale ich rozwój tworzy równocześnie rosnący strumień materiałów. W przypadku fotowoltaiki istotne są m.in. szkło, aluminium, krzem, miedź, tworzywa i komponenty elektroniczne. W energetyce wiatrowej znaczenie mają stal, beton, miedź, materiały kompozytowe i elektronika. Pompy ciepła i systemy magazynowania wymagają z kolei materiałów konstrukcyjnych, elektroniki oraz komponentów elektrotechnicznych. GOZ pozwala analizować ten rozwój nie tylko przez pryzmat ilości produkowanej energii, ale także przez materiały konieczne do uzyskania tej energii.

Cyrkularny system OZE powinien obejmować projektowanie urządzeń pod kątem trwałości i serwisowania, rozwój części zamiennych, możliwość modernizacji, ponowne wykorzystanie komponentów oraz recykling materiałów. Szczególnie ważna jest koncepcja przedłużania życia urządzenia. Jeżeli komponent może nadal bezpiecznie wykonywać swoją funkcję, jego przedwczesna wymiana może powodować niepotrzebne zapotrzebowanie na surowce. Z drugiej strony przedłużenie eksploatacji nie powinno prowadzić do nadmiernego wzrostu awaryjności lub zużycia energii.

Dla projektów OZE zasadne jest więc stosowanie podejścia wielokryterialnego: koszt inwestycyjny, sprawność, trwałość, wpływ środowiskowy, materiałochłonność, możliwość naprawy i końca życia powinny być rozpatrywane łącznie. W przyszłości przewagę konkurencyjną mogą uzyskać rozwiązania, które dostarczają usługę energetyczną przy mniejszym zużyciu materiałów i umożliwiają odzyskanie większej części wartości technicznej po zakończeniu pierwszego cyklu użytkowania.

11. Magazynowanie energii a GOZ

Magazynowanie energii staje się jednym z kluczowych elementów systemu energetycznego opartego na źródłach zależnych od warunków pogodowych. Rozwój magazynów zwiększa jednak zapotrzebowanie na materiały elektrochemiczne, dlatego konieczne jest równoległe rozwijanie modeli cyrkularnych.

W przypadku baterii podstawowe znaczenie ma wydłużenie okresu użytkowania. Stan techniczny ogniw zmienia się w czasie, a spadek zdolności magazynowania nie zawsze oznacza całkowitą utratę użyteczności. Bateria, która nie spełnia wymagań pojazdu elektrycznego, może w niektórych zastosowaniach stacjonarnych nadal posiadać użyteczną pojemność. Koncepcja drugiego życia polega na takim ponownym wykorzystaniu komponentu, aby zachować część jego wartości użytkowej.

Warunkiem bezpiecznego drugiego życia jest diagnostyka, kontrola parametrów, ocena stanu zdrowia baterii, bezpieczeństwo elektryczne i termiczne oraz odpowiednia dokumentacja. Jeżeli dalsze użytkowanie jest nieuzasadnione technicznie lub ekonomicznie, bateria powinna zostać skierowana do procesu recyklingu. Celem jest odzyskanie wartościowych materiałów i ograniczenie zapotrzebowania na surowce pierwotne.

W gospodarce cyrkularnej szczególnie ważne jest projektowanie baterii w sposób ułatwiający demontaż. Konstrukcja modułowa może pozwolić na wymianę części elementów bez konieczności wymiany całego systemu. Znaczenie ma również dostęp do informacji o składzie chemicznym, historii pracy i sposobie bezpiecznego demontażu. W przyszłości informacje te będą coraz częściej integrowane z cyfrowymi systemami identyfikacji produktu.

Dla energetyki odnawialnej oznacza to, że projektowanie magazynu powinno uwzględniać nie tylko sprawność ładowania i rozładowania, moc, pojemność oraz trwałość cykliczną, lecz również całkowity koszt środowiskowy i materiałowy. Inżynier powinien umieć ocenić, czy zwiększenie trwałości urządzenia jest korzystniejsze niż zastosowanie mniejszej ilości materiału, oraz czy możliwe jest odzyskanie komponentów po zakończeniu użytkowania.

Magazynowanie energii jest ważnym elementem transformacji energetycznej, ponieważ umożliwia przesuwanie w czasie produkcji i zużycia energii oraz zwiększa elastyczność systemu. Z punktu widzenia GOZ magazyn energii należy traktować jako produkt o określonym cyklu życia, a nie wyłącznie jako urządzenie poprawiające bilans energetyczny. Szczególnie istotne są trwałość, liczba cykli pracy, możliwość wymiany modułów, bezpieczeństwo oraz sposób zagospodarowania zużytych komponentów.

Baterie mogą być przedmiotem kolejnych zastosowań. Jeżeli ich parametry nie są już wystarczające dla wymaganej aplikacji, mogą w określonych warunkach znaleźć zastosowanie w mniej wymagających systemach stacjonarnych. Takie „drugie życie” może wydłużać okres wykorzystania materiałów, ale wymaga diagnostyki stanu technicznego, systemu zarządzania baterią, oceny bezpieczeństwa i analizy ekonomicznej. Dopiero po wyczerpaniu możliwości ponownego wykorzystania należy kierować materiały do procesów odzysku.

W projektowaniu magazynów energii istotne stają się również kwestie śladu materiałowego i surowców krytycznych. Inżynier powinien analizować nie tylko koszt kilowatogodziny magazynowanej energii, ale również trwałość cykliczną, możliwość serwisowania, efektywność energetyczną oraz scenariusz końca życia. Takie podejście łączy parametry elektrochemiczne z zasadami GOZ.

12. Modele biznesowe w gospodarce cyrkularnej

GOZ wymaga zmian nie tylko w technologii, ale również w modelach biznesowych. Tradycyjny model sprzedaży polega na przekazaniu produktu klientowi, po czym producent ma ograniczoną kontrolę nad jego dalszym użytkowaniem. W modelach cyrkularnych przedsiębiorstwo może zachować większą odpowiedzialność za produkt przez cały okres jego życia.

Jednym z modeli jest produkt jako usługa. Klient nie musi kupować urządzenia na własność, lecz nabywa określoną funkcję lub usługę. Przykładem może być sprzedaż energii lub usługi oświetleniowej zamiast samego urządzenia. Producent zachowujący własność sprzętu ma większą motywację do jego trwałości, naprawy i modernizacji, ponieważ odzyskuje wartość produktu w kolejnych cyklach.

Innym rozwiązaniem są modele współdzielenia. W przekazanym materiale wskazano ekonomię współdzielenia, w tym car-sharing i eko-mobilność. Współdzielenie może zwiększać wykorzystanie zasobu bez proporcjonalnego zwiększania liczby produktów. W energetyce podobną logikę można zastosować w przypadku wspólnot energetycznych, współdzielonych magazynów czy infrastruktury ładowania.

Modele biznesowe mogą również opierać się na naprawie, regeneracji i sprzedaży produktów używanych. Warunkiem jest dostępność części, wiedzy serwisowej i informacji o stanie produktu. Z ekonomicznego punktu widzenia ważne jest stworzenie rynku dla produktów odnowionych i komponentów wtórnych.

Cyrkularność nie jest więc wyłącznie kwestią środowiskową. Może tworzyć nowe miejsca pracy, rozwijać usługi serwisowe, zwiększać bezpieczeństwo dostaw surowców i tworzyć nowe źródła przychodów. Jednocześnie modele cyrkularne wymagają analizy ryzyka, ponieważ koszty zbiórki, transportu, sortowania i regeneracji mogą być wysokie. Sukces zależy od odpowiedniego zaprojektowania całego łańcucha wartości.

Cyrkularne modele biznesowe zmieniają sposób tworzenia i przechwytywania wartości. Zamiast sprzedaży produktu jako jednorazowego dobra możliwe jest oferowanie funkcji lub usługi. Przykładem może być sprzedaż usługi oświetleniowej zamiast opraw, wynajem urządzenia, leasing, model pay-per-use czy współdzielenie. Producent pozostaje wówczas zainteresowany trwałością i możliwością naprawy, ponieważ zachowuje relację z produktem przez dłuższy czas.

Do istotnych modeli należą również ponowne użycie, naprawa, refurbishing, remanufacturing, recykling oraz platformy współdzielenia. Różnią się one stopniem zachowania wartości. Ponowne użycie produktu pozwala zachować jego funkcję w największym zakresie, podczas gdy recykling często zachowuje przede wszystkim materiał. Dlatego ocena modelu biznesowego powinna uwzględniać miejsce na hierarchii wartości oraz realne efekty środowiskowe.

W sektorze energetycznym model usługowy może obejmować np. sprzedaż energii, usługę zarządzania energią, magazynowanie jako usługę albo leasing instalacji OZE. Producent lub operator może być odpowiedzialny za konserwację, modernizację i zagospodarowanie urządzenia. Taki model tworzy bodźce ekonomiczne do wydłużania życia produktów, ale wymaga odpowiedniego finansowania, systemów monitorowania i jasnego podziału odpowiedzialności.

13. Wskaźniki i pomiar cyrkularności

Nie można skutecznie zarządzać GOZ bez pomiaru postępu. Wskaźniki powinny umożliwiać ocenę zarówno przepływów materiałowych, jak i rezultatów środowiskowych, gospodarczych i społecznych. W ramach unijnego monitoringu gospodarki o obiegu zamkniętym stosuje się zestaw wskaźników pogrupowanych w obszary produkcji i konsumpcji, gospodarki odpadami, surowców wtórnych, konkurencyjności i innowacji oraz globalnej trwałości i odporności.

Jednym z ważnych wskaźników jest circular material use rate, czyli udział materiałów pochodzących z recyklingu w ogólnym zużyciu materiałów. Wskaźnik ten pozwala oceniać, w jakim stopniu gospodarka korzysta z materiałów wtórnych. Nie pokazuje jednak całej cyrkularności systemu. Wysoki poziom wykorzystania surowców wtórnych może współistnieć z krótką trwałością produktów lub wysoką konsumpcją.

Dla przedsiębiorstwa energetycznego można opracować zestaw wskaźników obejmujący udział materiałów wtórnych w urządzeniach, masę odpadów na jednostkę wyprodukowanej energii, udział komponentów możliwych do naprawy, średni czas użytkowania urządzeń, udział komponentów poddawanych ponownemu użyciu, odzysk materiałów po demontażu oraz udział dostawców oferujących rozwiązania serwisowe.

Ważnym narzędziem jest również analiza przepływów materiałowych MFA. Pozwala ona określić ilości materiałów wchodzących do systemu, pozostających w zasobie oraz opuszczających system w postaci odpadów lub emisji. W połączeniu z LCA można uzyskać bardziej kompleksowy obraz skutków środowiskowych.

Wskaźniki powinny być interpretowane ostrożnie. Redukcja masy odpadu nie musi oznaczać poprawy, jeśli odpady są zastępowane emisjami lub zwiększa się zużycie innych materiałów. Dlatego potrzebny jest zestaw wskaźników, a nie pojedyncza miara. W praktyce zarządzania GOZ przydatne jest łączenie wskaźników materiałowych, energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych.

Nie można skutecznie zarządzać transformacją bez jej pomiaru. W prezentacji wskazano potrzebę opracowania systemu wskaźników pozwalających ocenić postęp GOZ na poziomie mikro-, mezo- i makroekonomicznym. Współczesne podejście europejskie obejmuje pięć obszarów: produkcję i konsumpcję, gospodarkę odpadami, surowce wtórne, konkurencyjność i innowacje oraz globalną zrównowagę i odporność. Takie ujęcie pokazuje, że cyrkularność nie jest pojedynczym parametrem.

Przykładowe wskaźniki obejmują produktywność zasobów, ślad materiałowy, ślad konsumpcyjny, wskaźnik wykorzystania materiałów w obiegu zamkniętym, ilość wytwarzanych odpadów, poziom recyklingu, wykorzystanie surowców wtórnych oraz zależność materiałową. Wskaźniki powinny być interpretowane w kontekście celu. Wysoki poziom recyklingu może współistnieć z wysokim zużyciem surowców pierwotnych, jeżeli całkowita konsumpcja materiałów rośnie szybciej niż odzysk.

Dla przedsiębiorstwa OZE przydatne są także wskaźniki operacyjne: udział materiałów pochodzących z recyklingu, masa materiałów przypadająca na jednostkę mocy, trwałość komponentów, czas naprawy, udział komponentów możliwych do ponownego wykorzystania, poziom odzysku materiałów oraz udział dostawców oferujących rozwiązania cyrkularne. Dobór wskaźników powinien być związany z decyzjami zarządczymi, a nie ograniczać się do raportowania.

14. Odpady żywnościowe, konsumpcja i edukacja

Jednym z przykładów GOZ przedstawionych w materiale źródłowym jest problem marnotrawstwa żywności. Odpady żywnościowe powstają na wielu etapach łańcucha: podczas produkcji, przetwarzania, transportu, sprzedaży, gastronomii oraz w gospodarstwach domowych. Ograniczenie marnotrawstwa jest działaniem bardziej zgodnym z hierarchią GOZ niż późniejsze zagospodarowanie odpadów.

W materiale wskazano dane dotyczące odpadów żywnościowych w Polsce, w tym około 6,6 mln Mg z produkcji żywności, około 2,2 mln Mg z gospodarstw domowych i około 0,35 mln Mg z innych źródeł, przy czym dane te należy traktować jako wartości odnoszące się do materiału i jego metodologii. Wskazano również potrzebę ograniczania strat w łańcuchu produkcji i dostaw, poprawy oznaczania dat ważności oraz dążenia do zmniejszenia ilości odpadów spożywczych o połowę do 2030 r.

Problem żywności jest istotny także z perspektywy energetycznej. Produkcja żywności wymaga energii, wody, nawozów, transportu i infrastruktury. Jeżeli żywność zostaje zmarnowana, zmarnowane zostają również zasoby wykorzystane do jej wytworzenia. Dlatego ograniczenie marnotrawstwa może mieć większe znaczenie niż samo energetyczne wykorzystanie powstałego odpadu.

Edukacja jest warunkiem trwałej zmiany. Materiał źródłowy wskazuje, że działania edukacyjne powinny obejmować szkoły, uczelnie, szkolenia branżowe, konferencje i inne formy podnoszenia kompetencji. Edukacja cyrkularna powinna obejmować zarówno wiedzę techniczną, jak i umiejętność oceny całego cyklu życia technologii.

Inżynier przyszłości powinien potrafić wyjaśnić klientowi, dlaczego trwałość urządzenia ma znaczenie, jakie są możliwości naprawy, jak zagospodarować zużyty komponent oraz dlaczego „ekologiczny produkt” powinien być oceniany w całym cyklu życia. Kompetencje komunikacyjne są więc częścią kompetencji zawodowych w GOZ.

Prezentacja poświęca znaczną uwagę marnotrawstwu żywności. Jest to ważny przykład GOZ, ponieważ żywność zawiera nie tylko wartość materialną produktu, ale także energię, wodę, składniki mineralne i pracę wykorzystane w całym łańcuchu dostaw. Strata żywności oznacza zatem utratę zasobów zaangażowanych wcześniej w jej produkcję. Z punktu widzenia GOZ najważniejsze jest zapobieganie powstawaniu strat, a dopiero później zagospodarowanie pozostałości.

W prezentacji wskazano strumienie odpadów związanych z produkcją żywności, gospodarstwami domowymi oraz sektorem gastronomicznym i handlowym. Podane wartości należy traktować jako dane odnoszące się do konkretnego badania i okresu, a nie jako bezterminowo aktualną statystykę. W dydaktyce warto na ich podstawie pokazywać metodę analizy: określenie źródła odpadu, jego masy, wartości ekonomicznej, przyczyny powstawania oraz możliwego sposobu zapobiegania.

Edukacja jest instrumentem systemowym, ponieważ łączy producentów, konsumentów i administrację. Badania przedstawione w prezentacji pokazują, że znajomość pojęcia GOZ może być niższa niż znajomość segregacji czy recyklingu. Oznacza to potrzebę przechodzenia od edukacji o samym odpadowaniu do edukacji o całym cyklu życia produktu. Przyszły inżynier powinien potrafić wyjaśnić, że ograniczenie zużycia zasobów jest działaniem wcześniejszym niż prawidłowe sortowanie odpadu.

15. Transformacja energetyczna i cyrkularność – podejście systemowe

Transformacja energetyczna i GOZ powinny być projektowane wspólnie. Energetyka odpowiada za znaczącą część zużycia zasobów i emisji, ale sama transformacja technologiczna może generować nowe presje materiałowe. Rozwój OZE zwiększa zapotrzebowanie na infrastrukturę, magazyny, sieci, elektronikę i surowce krytyczne. Z tego względu niezbędne jest podejście systemowe.

Pierwszym elementem jest efektywność energetyczna. Najbardziej zasobooszczędna energia to często ta, której nie trzeba wyprodukować. Ograniczenie zapotrzebowania zmniejsza potrzebę budowy nowych mocy, infrastruktury i urządzeń. Drugim elementem jest wykorzystanie źródeł odnawialnych. Trzecim – integracja sektorów, magazynowanie, elastyczność popytu i rozwój inteligentnych sieci. Czwartym – cyrkularność infrastruktury.

System energetyczny powinien być oceniany w całym cyklu życia. Oznacza to uwzględnienie wydobycia surowców, produkcji urządzeń, transportu, montażu, eksploatacji, serwisowania, demontażu i zagospodarowania końcowego. W ten sposób można uniknąć sytuacji, w której poprawa jednego parametru prowadzi do pogorszenia innego.

W praktyce projektowania inwestycji OZE warto stosować zasadę „design for circularity”. Już na etapie koncepcji należy określić, co stanie się z instalacją po 20–30 latach użytkowania. Powinien istnieć plan demontażu, identyfikacji materiałów, ponownego wykorzystania komponentów oraz recyklingu. Taki sposób projektowania może również zmniejszać przyszłe koszty inwestora.

GOZ może zwiększać odporność sektora energetycznego. Jeżeli część komponentów można naprawić lokalnie, ogranicza się zależność od globalnych dostaw. Jeżeli materiały są odzyskiwane, zmniejsza się potrzeba importu surowców pierwotnych. Jeżeli przedsiębiorstwo posiada dane o stanie urządzeń, może lepiej planować remonty i zakupy. Cykularność staje się więc elementem zarządzania ryzykiem technologicznym i gospodarczym.

Transformacja energetyczna i GOZ mają wspólny cel ograniczenia presji środowiskowej, ale dotyczą różnych przepływów. Transformacja energetyczna zmienia strukturę źródeł i sposobów wykorzystania energii, natomiast GOZ koncentruje się na zasobach, produktach i materiałach. Integracja obu procesów jest konieczna, ponieważ każda technologia energetyczna ma materialne zaplecze. Rozwój OZE bez strategii materiałowej może przenosić część presji środowiskowej z paliw kopalnych na wydobycie minerałów i produkcję komponentów.

Podejście systemowe wymaga analizy sprzężeń zwrotnych. Wzrost efektywności energetycznej może zmniejszyć zapotrzebowanie na energię, ale może też zwiększyć dostępność ekonomiczną usług i prowadzić do wzrostu konsumpcji. Rozwój magazynowania poprawia elastyczność systemu, ale zwiększa zapotrzebowanie na materiały. Recykling zmniejsza zapotrzebowanie na surowce pierwotne, ale sam wymaga energii i infrastruktury. Dlatego decyzje powinny być oparte na bilansach całego systemu.

Dla inżyniera OZE oznacza to konieczność współpracy z ekspertami z zakresu materiałoznawstwa, gospodarki odpadami, logistyki, ekonomii i zarządzania środowiskowego. Projekt energetyczny powinien zawierać nie tylko analizę produkcji energii i ekonomiki inwestycji, lecz także plan serwisowania, modernizacji, demontażu i zagospodarowania komponentów.

16. Bariery wdrażania GOZ

Transformacja do GOZ napotyka bariery techniczne, ekonomiczne, prawne, organizacyjne i społeczne. Barierą techniczną może być brak technologii umożliwiającej ekonomiczny odzysk materiału. Barierą ekonomiczną może być niska cena surowca pierwotnego w porównaniu z kosztem zbiórki i przetwarzania surowca wtórnego. Barierą organizacyjną może być brak współpracy pomiędzy producentem, użytkownikiem i podmiotem odpadowym.

Problemem jest również jakość materiałów wtórnych. Aby przedsiębiorstwo mogło wykorzystać surowiec wtórny, musi mieć pewność co do jego parametrów. Wymaga to standardów jakości, systemów certyfikacji i odpowiedniej kontroli. W przypadku komponentów energetycznych istotna jest także odpowiedzialność za bezpieczeństwo produktu używanego ponownie.

Kolejną barierą jest niedostateczna informacja. Jeżeli użytkownik nie wie, gdzie oddać zużyty produkt, system zwrotny nie działa efektywnie. Jeżeli producent nie zna dokładnego składu materiałowego urządzenia, recykler ma trudności z jego przetworzeniem. Jeżeli projektant nie ma danych o awaryjności, trudno ocenić trwałość.

Barierą może być również tzw. lock-in technologiczny, czyli uzależnienie od określonych standardów i infrastruktury. Systemy cyrkularne wymagają kompatybilności komponentów i informacji. Standaryzacja może więc odgrywać istotną rolę.

Wreszcie należy uwzględnić bariery behawioralne. Konsument może wybierać produkt tańszy zamiast trwalszego, przedsiębiorstwo może preferować zakup nowego urządzenia zamiast naprawy, a inwestor może koncentrować się wyłącznie na koszcie inwestycyjnym. Dlatego GOZ wymaga odpowiednich bodźców ekonomicznych i regulacyjnych.

Barierą techniczną może być brak możliwości łatwego rozdzielenia materiałów, niska jakość surowca wtórnego, brak standardów komponentów lub ograniczona dostępność technologii recyklingu. Bariera ekonomiczna pojawia się wtedy, gdy surowiec pierwotny jest tańszy niż odzyskany, a koszty środowiskowe nie są uwzględniane w cenie. Bariery organizacyjne obejmują brak współpracy w łańcuchu wartości, niewystarczającą wymianę informacji oraz brak odpowiedzialności za produkt po zakończeniu użytkowania.

Do barier społecznych należą przyzwyczajenia konsumentów, brak zaufania do systemu odzysku, niski poziom wiedzy oraz preferowanie nowych produktów nad naprawą. Dane z prezentacji dotyczące powodów niesegregowania odpadów pokazują, że przeszkodą mogą być zarówno zachowania, jak i infrastruktura. Wśród wskazywanych przyczyn pojawiają się m.in. brak miejsca, brak odpowiednich pojemników, brak wiary w ponowne wykorzystanie oraz niedostateczna informacja.

Przełamanie barier wymaga instrumentów łączących regulacje, ekonomię, technologię i edukację. Skuteczna polityka GOZ nie powinna ograniczać się do nakładania obowiązków. Powinna tworzyć warunki, w których rozwiązanie cyrkularne jest technicznie możliwe, ekonomicznie uzasadnione i społecznie akceptowalne.

17. Znaczenie regulacji i polityki publicznej

GOZ jest obszarem, w którym mechanizmy rynkowe są wspierane przez regulacje publiczne. Wynika to z faktu, że część kosztów środowiskowych nie jest bezpośrednio uwzględniana w cenie produktu. Regulacje mogą tworzyć wymagania dotyczące trwałości, ekoprojektowania, odpowiedzialności producenta, selektywnego zbierania i poziomów recyklingu.

Unijna polityka GOZ rozwija się od pierwszego planu działania z 2015 r. Współczesne podejście obejmuje również politykę zrównoważonych produktów, ekoprojektowanie, informacje o produktach i wzmacnianie rynku surowców wtórnych. Ważne jest, aby studenci rozumieli, że GOZ nie jest pojedynczą dyrektywą. Jest to kierunek polityki, który jest realizowany poprzez wiele aktów prawnych i instrumentów.

Polska Mapa drogowa GOZ, przyjęta w 2019 r., wyznaczyła krajowe obszary działań. W 2026 r. Ministerstwo Rozwoju i Technologii publikuje również raport z realizacji Mapy drogowej, co pokazuje znaczenie monitorowania postępów. Z punktu widzenia dydaktycznego ważne jest rozróżnienie dokumentu strategicznego od aktu prawnego. Strategia lub mapa drogowa wskazuje kierunek i zestaw działań, natomiast konkretne obowiązki przedsiębiorców wynikają z właściwych przepisów.

Regulacje mogą także tworzyć rynek dla rozwiązań cyrkularnych. System kaucyjny jest przykładem mechanizmu, który zmienia ekonomię zbiórki opakowań. ROP może wpływać na decyzje producentów. Wymogi dotyczące informacji o produkcie mogą zwiększać przejrzystość łańcucha dostaw.

Dla inżyniera ważna jest umiejętność rozpoznania, które wymagania mają charakter prawny, które wynikają z norm technicznych, a które są dobrowolnymi praktykami środowiskowymi. Błędne utożsamienie deklaracji marketingowej z obowiązkiem prawnym może prowadzić do niewłaściwych decyzji projektowych.

Na poziomie UE GOZ jest rozwijana poprzez pakiety i plany działań obejmujące cały cykl życia produktów. Pierwszy plan działania z 2015 r. obejmował 54 działania i koncentrował się m.in. na produkcji, konsumpcji, gospodarce odpadami i rynku surowców wtórnych. Drugi plan działania z 2020 r. został powiązany z Europejskim Zielonym Ładem i silniej zaakcentował projektowanie produktów oraz utrzymanie zasobów w gospodarce.

Ważne jest poprawne rozumienie statusu prawnego GOZ. Nie istnieje jedna „dyrektywa o gospodarce o obiegu zamkniętym”, która całościowo regulowałaby wszystkie działania. Transformacja jest wspierana przez wiele aktów prawnych dotyczących odpadów, produktów, opakowań, efektywności zasobowej, ekoprojektowania i odpowiedzialności producenta. Taki rozproszony charakter regulacji wymaga od przedsiębiorstw śledzenia całego otoczenia prawnego.

W Polsce podstawowym dokumentem strategicznym jest Mapa drogowa transformacji w kierunku GOZ przyjęta przez Radę Ministrów 10 września 2019 r. Wskazuje ona m.in. zrównoważoną produkcję, zrównoważoną konsumpcję, biogospodarkę i nowe modele biznesowe. Aktualny kontekst obejmuje również rozwój systemu kaucyjnego, cyfryzację gospodarki odpadami oraz narzędzia związane z ekoprojektowaniem i cyfrową identyfikacją produktu.

18. GOZ w przedsiębiorstwie – praktyczne podejście inżynierskie

Wdrożenie GOZ w przedsiębiorstwie powinno rozpoczynać się od diagnozy przepływów materiałowych i energetycznych. Należy określić, jakie surowce są kupowane, gdzie powstają straty, jakie odpady są generowane, jakie komponenty można odzyskać oraz które procesy wymagają największej ilości energii i wody. Następnie można wyznaczyć priorytety.

Pierwszym krokiem może być analiza ABC strumieni materiałowych. Największe ilościowo strumienie nie zawsze są najważniejsze ekonomicznie. Niewielka masa materiału o wysokiej wartości lub znaczeniu strategicznym może mieć większe znaczenie niż duża ilość materiału taniego. Dlatego analizę ilościową należy uzupełniać oceną wartości, ryzyka dostaw i wpływu środowiskowego.

Drugim krokiem jest identyfikacja możliwości ograniczenia zużycia. Można zmienić materiał, technologię, sposób pakowania lub logistykę. Trzecim krokiem jest wydłużenie życia produktów. Czwartym – rozwój systemu zwrotu i odzysku. Piątym – zagospodarowanie pozostałych odpadów zgodnie z hierarchią.

W przedsiębiorstwie energetycznym można prowadzić rejestr urządzeń i ich komponentów. Dla każdego urządzenia można określić rok produkcji, historię serwisową, zużycie energii, awaryjność, możliwość modernizacji oraz przewidywany koniec życia. Taki system pozwala planować gospodarkę częściami zamiennymi i odzysk komponentów.

Cyrkularność powinna być także uwzględniana w zamówieniach publicznych i zakupach przedsiębiorstwa. Kryterium ceny zakupu może być uzupełnione o trwałość, dostępność części, możliwość naprawy, efektywność energetyczną i koszty całego cyklu życia. TCO, czyli całkowity koszt posiadania, jest przydatniejszy niż sama cena zakupu.

W praktyce wdrożenie GOZ powinno mieć charakter ciągłego doskonalenia. Przedsiębiorstwo ustala cele, mierzy wskaźniki, analizuje odchylenia, wdraża działania i ponownie mierzy wyniki. W tym sensie GOZ może być integrowany z systemami zarządzania jakością, środowiskiem, energią i ryzykiem.

Wdrożenie GOZ w przedsiębiorstwie powinno rozpoczynać się od diagnozy przepływów materiałowych. Należy określić, jakie surowce są kupowane, gdzie powstają straty, które produkty i komponenty są naprawiane, jakie odpady powstają oraz jaka część materiałów wraca do procesu. Przydatne są bilanse masowe, analiza kosztów materiałowych, mapowanie strumienia wartości i analiza cyklu życia. Dopiero na podstawie diagnozy można ustalić priorytety.

Przedsiębiorstwo powinno następnie określić hierarchię działań: zapobieganie stratom, wydłużenie życia produktu, naprawa, ponowne użycie, regeneracja, odzysk materiałowy. W zakładzie związanym z OZE może to oznaczać np. program regeneracji falowników, system odzysku kabli, ponowne wykorzystanie konstrukcji montażowych czy kwalifikowanie używanych modułów do dalszej eksploatacji. Każde działanie powinno być oceniane pod kątem bezpieczeństwa, jakości i ekonomiki.

Zarządzanie GOZ wymaga także mierników i odpowiedzialności. Do każdego celu należy przypisać wskaźnik, osobę odpowiedzialną, okres pomiaru i sposób raportowania. Przykładowo celem może być zmniejszenie masy odpadów produkcyjnych na jednostkę mocy, zwiększenie udziału materiałów wtórnych albo wydłużenie średniego okresu użytkowania komponentu. Takie podejście przekształca GOZ z deklaracji środowiskowej w system zarządzania.

19. Znaczenie GOZ dla przyszłego inżyniera OZE

Każdy powinien postrzegać gospodarkę o obiegu zamkniętym jako kompetencję inżynierską, a nie wyłącznie temat środowiskowy. W praktyce zawodowej projektant instalacji będzie podejmował decyzje dotyczące technologii, materiałów, parametrów urządzeń, trwałości i serwisu. Każda z tych decyzji ma konsekwencje cyrkularne.

Inżynier powinien umieć odpowiedzieć na pytania: jaki jest cykl życia instalacji, jakie materiały są w niej zastosowane, czy komponent można naprawić, czy części są dostępne, jak urządzenie zostanie zdemontowane, jakie materiały zostaną odzyskane i kto odpowiada za zagospodarowanie odpadu. Powinien również znać podstawowe narzędzia oceny środowiskowej, takie jak LCA, analiza przepływów materiałowych oraz wskaźniki cyrkularności.

Ważna jest również umiejętność oceny kompromisów. Produkt może być bardzo trwały, ale trudny do recyklingu. Materiał może być łatwo recyklingowalny, ale wymagać większego zużycia energii w produkcji. Technologia może być tania, ale uzależniona od importu surowca krytycznego. Nie istnieje więc jedna prosta definicja „najbardziej ekologicznego” rozwiązania.

Kompetencje GOZ obejmują również współpracę interdyscyplinarną. Inżynier energetyk współpracuje z technologiem, elektrykiem, mechanikiem, specjalistą ds. środowiska, ekonomistą, prawnikiem i operatorem systemu odpadowego. Zamknięcie obiegu jest efektem współpracy całego łańcucha wartości.

Ostatecznym celem nie jest „brak odpadów za wszelką cenę”, lecz stworzenie systemu, w którym zasoby są wykorzystywane możliwie efektywnie, produkty zachowują funkcję i wartość przez długi czas, a pozostałości są zagospodarowywane w sposób bezpieczny i możliwie wartościowy.

Inżynier OZE powinien posiadać kompetencje techniczne i jednocześnie rozumieć środowiskowe oraz materiałowe konsekwencje swoich decyzji. Projektując instalację, wybiera nie tylko moc i sprawność urządzenia, ale również materiały, producentów, rozwiązania montażowe i sposób serwisowania. Każda z tych decyzji wpływa na przyszły cykl życia produktu.

W praktyce zawodowej przydatna jest umiejętność czytania danych środowiskowych, interpretowania wyników LCA, analizowania parametrów trwałości i efektywności materiałowej oraz planowania końca życia instalacji. Inżynier powinien umieć przygotować wymagania techniczne dla dostawców obejmujące nie tylko cenę i parametry energetyczne, ale również naprawialność, dostępność części, możliwość demontażu i odzysku.

GOZ zwiększa również znaczenie kompetencji cyfrowych. Monitoring urządzeń, predykcje utrzymania ruchu, identyfikacja komponentów, cyfrowe rejestry i analiza danych mogą wydłużać życie instalacji i ograniczać awarie. W przyszłości połączenie OZE, IoT, analityki danych i cyrkularnych modeli biznesowych będzie tworzyło nowe role zawodowe na styku energetyki, środowiska i gospodarki zasobami.

20. Podsumowanie – od gospodarki odpadami do gospodarki zasobami

Gospodarka o obiegu zamkniętym stanowi zmianę sposobu myślenia o gospodarce. W centrum zainteresowania znajduje się nie odpad, lecz zasób i jego wartość. Pytanie „co zrobić z odpadem?” zostaje zastąpione pytaniem „jak zaprojektować system, aby odpad nie powstał, a jeśli powstanie, aby zachować

możliwie dużą wartość materiału?”. To przesunięcie perspektywy ma ogromne znaczenie dla energetyki odnawialnej.

GOZ łączy efektywność materiałową, efektywność energetyczną, ekoprojektowanie, naprawę, ponowne użycie, regenerację, recykling, logistykę odzysku, biogospodarkę, odpowiedzialną konsumpcję i nowe modele biznesowe. Wymaga także regulacji, infrastruktury, danych i edukacji. W przekazanym materiale podkreślono, że GOZ jest związany z budową gospodarki zrównoważonej, niskoemisyjnej, zasobooszczędnej i konkurencyjnej.

Szczególne znaczenie ma połączenie GOZ z transformacją energetyczną. OZE zmniejszają zależność od paliw kopalnych, ale nie eliminują potrzeby stosowania materiałów. Dlatego przyszła energetyka musi być nie tylko odnawialna i niskoemisyjna, lecz także zasobooszczędna i cyrkularna. Instalacja PV, turbina wiatrowa, pompa ciepła czy magazyn energii powinny być projektowane z myślą o całym cyklu życia.

GOZ nie jest stanem, który można osiągnąć jedną inwestycją. Jest procesem ciągłego doskonalenia. Jego powodzenie zależy od jakości decyzji podejmowanych na każdym etapie cyklu życia produktu. Im wcześniej uwzględnimy zasady cyrkularności, tym większa jest możliwość ograniczenia kosztów środowiskowych i ekonomicznych. Dlatego GOZ powinien być traktowany jako jedna z podstawowych zasad projektowania przyszłej gospodarki energetycznej.

Najważniejszą zmianą myślenia wynikającą z GOZ jest przejście od koncentracji na odpadzie do koncentracji na zasobie. W modelu liniowym głównym problemem jest sposób usunięcia odpadu. W modelu cyrkularnym pytanie brzmi wcześniej: dlaczego powstał odpad, czy można było go uniknąć, czy produkt można było naprawić, czy materiał można było ponownie wykorzystać oraz czy projekt przewidywał jego przyszły demontaż.

GOZ wymaga łączenia poziomów mikro, mezo i makro. Na poziomie przedsiębiorstwa analizuje się produkty i procesy, na poziomie regionu – infrastrukturę, logistykę i przepływy materiałów, a na poziomie gospodarki – produktywność zasobów, zależność importową i odporność systemu. W prezentacji podkreślono właśnie potrzebę pomiaru transformacji na poziomie mezoekonomicznym i makroekonomicznym.

Najważniejszy wniosek jest taki, że niskoemisyjna energia i cyrkularne gospodarowanie zasobami powinny być projektowane razem. Instalacja, która produkuje energię odnawialną, ale jest trudna do naprawy, nadmiernie materiałochłonna i generuje trudne do odzysku odpady, nie wykorzystuje pełnego potencjału transformacji. Celem jest system energetyczny, który jednocześnie ogranicza emisje, zużycie zasobów, ilość odpadów i zależność od surowców pierwotnych.