

Joanna Czaplak

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej

Wydział Ekonomiczny

Katedra Polityki Gospodarczej i Regionalnej

joanna.czaplak@mail.umcs.pl,  <https://orcid.org/0000-0002-9814-9668>

Ocena ekoefektywności gospodarki odpadami komunalnymi w Polsce z wykorzystaniem metody DEA

Zarys treści: W artykule przeprowadzono analizę gospodarki odpadami komunalnymi w 2023 r. w polskich miastach stanowiących rdzenie miejskich obszarów funkcjonalnych. Głównym celem badań była kompleksowa analiza porównawcza efektywności technicznej i ekoefektywności systemów gospodarowania odpadami w wyżej wspomnianych miastach. Zastosowane podejście badawcze obejmowało pomiar obu efektywności za pomocą metody DEA oraz ocenę wpływu zmiennych środowiskowych na uzyskane wyniki. Średni poziom wskaźników efektywności w 2023 r. kształtował się na poziomie około 0,6, co wskazuje na potrzebę poprawy funkcjonowania systemów gospodarowania odpadami w ocenianych miastach. Na podstawie przeprowadzonej analizy empirycznej zidentyfikowano również główne czynniki warunkujące efektywność gospodarowania odpadami komunalnymi w polskich miastach oraz sformułowano rekomendacje służące poprawie funkcjonowania tych systemów w badanych jednostkach samorządu terytorialnego.

Słowa kluczowe: gospodarka odpadami komunalnymi, ekoefektywność, analiza obwiedni danych (DEA), samorząd terytorialny, gospodarka o obiegu zamkniętym

Wprowadzenie

Intensyfikacja procesów urbanizacyjnych oraz wzrost konsumpcji dóbr doprowadziły do bezprecedensowego wzrostu produkcji odpadów w wielu miastach na świecie, czyniąc gospodarkę nimi jednym z najpoważniejszych problemów współczesnych społeczeństw. W odpowiedzi na te wyzwania powstała koncepcja gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), którą Unia Europejska (UE) uczyniła priorytetem swojej polityki środowiskowej, zobowiązując kraje członkowskie dyrektywą 2018/851 do jej implementacji. Model ten opiera się na założeniu, że można ograniczyć zużycie materiałów i energii oraz zminimalizować degradację środowiska naturalnego przy zachowaniu potencjału wzrostu gospodarczego.

GOZ stanowi alternatywę dla tradycyjnego liniowego modelu produkcji i konsumpcji, promując zamknięty obieg materiałów, w którym odpady z jednych procesów stają się surowcem dla innych (Smol i in. 2019, s. 166). Kluczowym jego elementem jest hierarchia postępowania z odpadami, zgodnie z którą priorytetem jest zapobieganie ich powstawaniu, następnie przygotowanie do ponownego użycia, recykling oraz inne metody odzysku, podczas gdy unieszkodliwianie traktowane jest jako ostateczność (Lorek 2007, s. 23–32).

Szczególną rolę w implementacji założeń gospodarki o obiegu zamkniętym w krajach członkowskich UE odgrywa efektywny system gospodarowania odpadami komunalnymi. Spośród wszystkich strumieni odpadów to właśnie odpady komunalne, ze względu na swoją złożoność i różnorodność, stanowią priorytetowy obszar polityki środowiskowej UE. Odpowiedzialność za ich właściwe zagospodarowanie spoczywa na jednostkach samorządu terytorialnego (JST), które muszą nie tylko zapewnić sprawny system odbioru odpadów komunalnych, ale również osiągnąć wyznaczone przez UE cele środowiskowe. Obejmują one m.in. osiągnięcie określonych poziomów recyklingu 55% do 2025 r., 60% do 2030 r., 65% do 2035 r. przy jednoczesnym ograniczeniu składowania odpadów do 2030 r. (Smol i in. 2019, s. 168–169).

Realizacja wyżej wymienionych celów stanowi szczególne wyzwanie dla polskich JST, które zmagają się nie tylko z rosnącą ilością wytwarzanych odpadów komunalnych (wg prognoz zawartych w Krajowym Planie Gospodarki Odpadami przewiduje się wzrost ich ilości nawet o 10,89% w 2030 r. w porównaniu do 2014 r.), ale również z niewystarczająco rozwiniętą infrastrukturą do selektywnej zbiórki i przetwarzania odpadów oraz z rosnącymi kosztami funkcjonowania systemów gospodarowania odpadami (zob. Smol 2022).

W świetle powyższych wyzwań stojących przed JST w Polsce monitorowanie i ocena efektywności systemu gospodarki odpadami komunalnymi nabiera szczególnego znaczenia. Jak podkreślają Delgado-Antequera i in. (2021), ocena ta powinna dostarczać kluczowych informacji z perspektywy ekonomicznej i środowiskowej, zgodnie z koncepcją efektywności. W JST koncepcja ta stanowi filozofię zarządzania, która koncentruje się na osiąganiu trzech celów: optymalizacji kosztów świadczenia lokalnych usług publicznych, minimalizacji ich oddziaływania na środowisko naturalne oraz zapewnieniu wysokiej jakości życia mieszkańców (Zou i in. 2024, s. 2). Takie kompleksowe podejście do ewaluacji gospodarowania odpadami komunalnymi uwzględnia zarówno potrzebę minimalizacji przez JST kosztów funkcjonowania systemów gospodarowania odpadami komunalnymi, które mają wpływ na poziom opłat ponoszonych przez mieszkańców, jak i konieczność ograniczenia negatywnego oddziaływania tych odpadów na społeczeństwo i środowisko.

Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych za główny cel badania przyjęto kompleksową analizę porównawczą efektywności technicznej i efektywności gospodarki odpadami komunalnymi w wybranych miastach w Polsce. Przesłanką podjęcia tego tematu jest niedostatek badań w literaturze przedmiotu wykorzystujących metodę DEA do analizy polskiego systemu gospodarki odpadami, szczególnie takich, które łączyłyby ocenę efektywności

technicznej i ekoefektywności. Ponadto jako cel dodatkowy przyjęto identyfikację wpływu zmiennych środowiskowych na efektywność techniczną i ekoefektywność gospodarowania odpadami w ocenianych JST.

Realizacji wyżej postawionych celów artykułu służą następujące pytania badawcze:

1. Czy miasta osiągające wysoką efektywność techniczną gospodarki odpadami komunalnymi charakteryzują się również wysoką ekoefektywnością?
2. Czy poziom edukacji mieszkańców, gęstość zaludnienia oraz aktywność turystyczna wpływają na efektywność gospodarki odpadami komunalnymi w analizowanych miastach?

W kontekście rosnących wymagań środowiskowych i ograniczonych środków finansowych polskich JST przeprowadzone badanie nabiera szczególnego znaczenia, zwłaszcza że zastosowanie koncepcji ekoefektywności do analizy polskich systemów gospodarki odpadami komunalnymi nie było dotychczas przedmiotem kompleksowych badań empirycznych. Ponadto wyniki analizy mogą w związku z tym służyć jako narzędzie wspomagające identyfikację najefektywniejszych praktyk gospodarowania odpadami komunalnymi.

Przegląd literatury przedmiotu

W literaturze przedmiotu pomiar efektywności gospodarki odpadami stanowi przedmiot licznych badań empirycznych, przy czym znacząca część analiz koncentruje się na efektywności ekonomicznej (Worthington, Dollery 2001, Pérez-López i in. 2016, Das Mercês Costa i in. 2024). Narastające wyzwania związane ze zmianami klimatu oraz postępująca degradacja środowiska naturalnego skłoniły naukowców do przyjęcia szerszej perspektywy w ocenie efektywności systemów gospodarki odpadami komunalnymi. W rezultacie w literaturze przedmiotu można zaobserwować znaczący wzrost badań uwzględniających aspekty środowiskowe, ze szczególnym naciskiem na koncepcję ekoefektywności (Llanquileo-Melgarejo, Molinos-Senante 2022, Zhao i in. 2024).

Pierwsze teoretyczne podstawy ekoefektywności sformułowali Schaltegger i Sturm (1989), definiując ją jako relację między wartością dodaną danej działalności gospodarczej a jej wpływem na środowisko. Istotą tego podejścia jest dążenie do wzrostu produkcji dóbr i usług przy jednoczesnym ograniczaniu zużycia zasobów oraz minimalizowaniu negatywnego wpływu działalności gospodarczej na środowisko (Llanquileo-Melgarejo, Molinos-Senante 2021, s. 28337). Wraz z rozwojem badań koncepcja ekoefektywności znacząco ewoluowała, wykraczając poza pierwotne zastosowania na poziomie pojedynczych produktów czy przedsiębiorstw. Obecnie służy jako kompleksowe narzędzie oceny zrównoważonego rozwoju w skali branż, miast, regionów i całych krajów (Zou i in. 2024, s. 2).

Z perspektywy metodologicznej ocena ekoefektywności gospodarki odpadami komunalnymi opiera się na dwóch głównych podejściach: wskaźnikowym oraz granicznym (Huang i in. 2014, s. 228). Podejście wskaźnikowe zakłada konstrukcję miar, w których ekoefektywność wyrażana jest jako stosunek wartości

produktów lub usług do ich wpływu na środowisko (Masternak-Janus, Rybaczewska-Błażejowska 2017, s. 181) Należy jednak zauważyć, że wskaźniki stanowią wyłącznie cząstkowe miary efektywności. Bez odpowiedniej metodyki agregacji analiza oparta wyłącznie na nich może prowadzić do błędnych interpretacji dotyczących efektywności gospodarki odpadami (Molinos-Senante i in. 2024, s. 5678).

W odpowiedzi na te ograniczenia coraz częściej w ocenie efektywności gospodarowania odpadami komunalnymi stosowane są metody graniczne, w szczególności analiza obwiedni danych (*Data Envelopment Analysis* – DEA) (zob. Delgado-Antequera i in. 2021, Pais-Magalhães i in. 2021, Lo Storto 2024). Metoda ta umożliwia pomiar względnej efektywności podmiotów zwanych jednostkami decyzyjnymi (*Decision Making Units* – DMU). Kluczową zaletą tej metody jest możliwość jednoczesnego uwzględnienia wielu zmiennych wyrażonych w różnych jednostkach miary, bez konieczności określania a priori zależności funkcyjnej między nakładami (zmiennymi wejściowymi) a efektami (zmiennymi wyjściowymi) (Cooper i in. 2011, s. 2–3). Jest to metoda szczególnie istotna w przypadku oceny systemów gospodarki odpadami komunalnymi, gdzie występuje wiele różnorodnych efektów oraz nakładów, a sama ocena wymaga uwzględnienia zarówno aspektów ilościowych, jak i jakościowych.

W metodzie DEA kluczowym wyzwaniem metodologicznym jest właściwy dobór zmiennych do analizy, który zwykle opiera się na przeglądzie literatury przedmiotu. Nawiązując do wcześniej omówionej koncepcji efektywności w gospodarce odpadami komunalnymi, konieczne jest uwzględnienie w analizie zarówno aspektu ekonomicznego, jak i środowiskowego. Badacze stosujący metodę DEA zwykle operacjonalizują ten dwuwymiarowy charakter poprzez odpowiednią strukturę zmiennych w modelu. Efektywność ekonomiczna odzwierciedla relacje pomiędzy nakładami finansowymi a całkowitą masą odebranych odpadów komunalnych, podczas gdy efektywność określa zależność między kosztami operacyjnymi systemu a strukturą strumieni odpadów sklasyfikowanych według sposobów ich dalszego zagospodarowania (zob. Llanquileo-Melgarejo i in. 2021, Milanović i in. 2022). W efekcie przyjmują konstrukcję modelu, w której odpady niesegregowane klasyfikowane są jako zmienna wyjściowa niepożądana, podczas gdy odpady segregowane lub poziom recyklingu traktowane są jako zmienne wyjściowe pożądane.

W analizach wykorzystujących metodę DEA istotne znaczenie ma identyfikacja czynników kontekstowych, które mogą wpływać na uzyskane wyniki efektywności, ale nie są bezpośrednio kontrolowane przez jednostki decyzyjne. Do najczęściej analizowanych czynników kontekstowych w gospodarce odpadami należą: charakterystyki demograficzne (gęstość zaludnienia, struktura wiekowa), czynniki społeczno-ekonomiczne (poziom edukacji, dochody mieszkańców, stopa bezrobocia), czynniki geograficzne oraz specyficzne uwarunkowania lokalne (aktywność turystyczna) (Molinos-Senante i in. 2023, Daraio i in. 2024, Lo Storto 2024).

Metoda badań

W artykule przyjęto dwuetapowe podejście do oceny efektywności gospodarki odpadami komunalnymi. W pierwszej kolejności dokonano pomiaru i oceny efektywności technicznej oraz efektywności gospodarki odpadami komunalnymi w badanych miastach w 2023 r. Następnie przeanalizowano związek wybranych zmiennych kontekstowych z uzyskanymi wynikami efektywności.

W ramach pierwszego etapu badań konieczne było skonstruowanie dwóch modeli odzwierciedlających różne perspektywy oceny efektywności gospodarki odpadami komunalnymi (zob. tab. 1). Pierwszy model (M1) koncentrował się na efektywności technicznej, która pozwala ocenić operacyjną sprawność systemu gospodarki odpadami z perspektywy ekonomicznej. Model ten uwzględnia wyłącznie całkowitą ilość zebranych odpadów, abstrahując od ich dalszego zagospodarowania. Drugi model (M2) służył do pomiaru efektywności, która wykracza poza tradycyjną efektywność techniczną poprzez jednoczesne uwzględnienie aspektów ekonomicznych i środowiskowych. Model efektywności ocenia zdolność systemu do maksymalizacji poziomu recyklingu przy jednoczesnej minimalizacji ilości odpadów kierowanych do składowania lub spalania w relacji do poniesionych nakładów finansowych. W obu modelach jako zmienną wejściową przyjęto wydatki JST na gospodarkę odpadami w przeliczeniu na mieszkańca. Model M2 uwzględnił sposób gospodarowania odpadami poprzez analizę poziomu recyklingu odpadów zebranych selektywnie oraz masy odpadów zmieszanych per capita. Dla tej ostatniej zmiennej, uznanej za niepożądaną, wykorzystano transformację linową Seiforda i Zhu (2005) umożliwiającą włączenie jej do modelu jako zmiennej pożądananej.

Tabela 1. Charakterystyki zmiennych wykorzystanych do pomiaru efektywności metodą DEA

Zmienna	Miara zmiennej	M1	M2
Wejściowa	Wydatki JST na gospodarkę odpadami (mln zł/os.)	×	×
Wyjściowa	Masa odebranych odpadów (t/os.)	×	
Wyjściowa	Wskaźnik recyklingu odpadów komunalnych (%)		×
Niepożądana	Masa odebranych odpadów zmieszanych (t/os.)		×
Kontekstowa	Masa odpadów wytworzonych przez mieszkańców (t/os.)	×	×
	Gęstość zaludnienia (os./km ²)	×	×
	Udział ludności w wieku poprodukcyjnym (%)	×	×
	Poziom edukacji – absolwenci szkół ponadgminajnych i ponadpodstawowych na 1000 mieszkańców (lb./os.)	×	×
	Wskaźnik aktywności turystycznej – liczba miejsc noclegowych na 100 mieszkańców (lb./os.)	×	×

M1 – efektywność techniczna, M2 – efektywność

Źródło: opracowanie własne.

W obu modelach zastosowano metodę DEA o stałych efektach skali, przyjmując nieorientowany wariant oceny efektywności badanych JST. Brak orientacji

w metodzie DEA oznacza, że możliwe jest jednocześnie zwiększenie efektów oraz zmniejszenie nakładów analizowanego podmiotu. Takie podejście umożliwia kompleksową ocenę funkcjonowania gospodarki odpadami komunalnymi w badanych miastach, uwzględniającą zarówno aspekty ekonomiczne (konieczność obniżenia kosztów funkcjonowania systemu gospodarowania odpadami komunalnymi i związany z nim poziom opłat ponoszonych przez mieszkańców), jak i kwestie środowiskowe (skuteczność działań w zakresie odbioru i zagospodarowania odpadów).

W drugim etapie badań w obu modelach zbadano wpływ takiego samego zestawu zmiennych kontekstowych, do których zaliczono: całkowitą masę wytwarzanych odpadów przez mieszkańców, gęstość zaludnienia JST, poziom edukacji mierzony liczbą absolwentów szkół ponadgimnazjalnych i ponadpodstawowych oraz aktywność turystyczną. W przypadku zmiennej dotyczącej turystyki jako miarę aktywności turystycznej przyjęto liczbę miejsc noclegowych przypadających na 1000 tys. mieszkańców w obiektach hotelowych. Do weryfikacji wpływu zmiennych kontekstowych na efektywność techniczną (M1) oraz ekoefektywność (M2) wykorzystano współczynnik korelacji tau Kendalla, który jest odpowiedni dla małej liczby obserwacji.

Zakres podmiotowy badania obejmował 32 miasta na prawach powiatu, które zgodnie z rekomendacjami delimitacji P. Śleszyńskiego tworzą rdzenie wojewódzkich obszarów funkcjonalnych (zob. Śleszyński 2013). Przyjęta metodologia delimitacji zapewnia jednorodność badanych jednostek pod względem uwarunkowań rozwojowych oraz istniejących powiązań funkcjonalno-przestrzennych, co ma kluczowe znaczenie w metodzie DEA, gdzie należy porównywać jednostki względnie jednorodne. Zgodnie z zaleceniami delimitacji P. Śleszyńskiego zdecydowano o wyłączeniu z badania Warszawy, która ze względu na funkcje stołeczne i znacząco większy potencjał społeczno-gospodarczy stanowiłaby niedościgniony wzorzec dla pozostałych JST.

Analizę przeprowadzono dla roku 2023, dla którego były dostępne kompletne i porównywalne dane, które pozyskano z Banku Danych Lokalnych GUS oraz raportów rocznych o gospodarce odpadami publikowanych przez JST.

Wyniki badań

W pierwszym etapie analizy dokonano oceny efektywności technicznej i ekoefektywności gospodarowania odpadami komunalnymi w badanych JST, wykorzystując metodę DEA. Obliczone wskaźniki przyjęły wartości od 0 do 1, gdzie 0 oznacza pełną nieefektywność, a 1 wskazuje na wzorcową efektywność gospodarowania odpadami (tab. 2).

Spośród badanych miast, w 12 przypadkach odnotowano minimalne różnice między analizowanymi wskaźnikami (do kilku procent). W tej grupie oba wskaźniki kształtowały się poniżej średniej, co wskazuje na trudność w osiągnięciu przez JST wysokiej efektywności jednocześnie w wymiarze ekonomicznym i środowiskowym. Na tym tle wyróżniał się Toruń, który jako jedyne miasto osiągnął

Tabela 2. Efektywność gospodarki odpadami komunalnymi w badanych miastach w 2023 r.

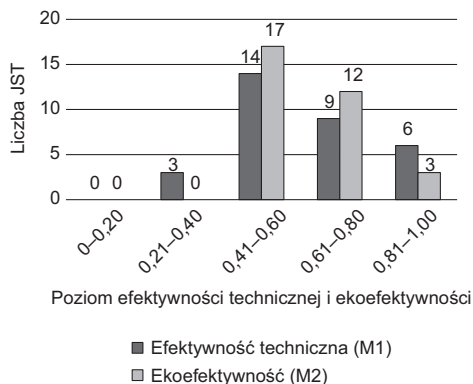
Lp.	Miasto	M1	M2	M1 – M2
1	Białystok	0,54	1,00	–0,46
2	Bydgoszcz	0,52	0,82	–0,30
3	Bytom	0,53	0,63	–0,10
4	Chorzów	0,52	0,56	–0,04
5	Dąbrowa Górnicza	0,56	0,49	0,07
6	Gdańsk	0,61	0,61	–0,01
7	Gdynia	0,58	0,82	–0,24
8	Gliwice	0,70	0,64	0,06
9	Gorzów Wielkopolski	0,52	0,59	–0,07
10	Jaworzno	0,65	0,55	0,10
11	Katowice	0,72	0,51	0,20
12	Kielce	0,72	0,92	–0,19
13	Kraków	0,78	0,55	0,23
14	Lublin	0,64	0,84	–0,20
15	Łódź	0,63	0,52	0,11
16	Mysłowice	0,52	0,46	0,06
17	Olsztyn	0,51	0,58	–0,07
18	Opole	0,72	0,67	0,05
19	Piekary Śląskie	0,46	0,50	–0,04
20	Poznań	1,00	0,60	0,40
21	Ruda Śląska	0,54	0,50	0,05
22	Rzeszów	0,63	0,76	–0,14
23	Siemianowice Śląskie	0,62	0,54	0,07
24	Sopot	1,00	0,28	0,72
25	Sosnowiec	0,58	0,71	–0,13
26	Szczecin	0,56	0,56	0,00
27	Świętochłowice	0,44	0,65	–0,21
28	Toruń	1,00	1,00	0,00
29	Tychy	0,52	0,77	–0,25
30	Wrocław	0,73	0,24	0,49
31	Zabrze	0,55	0,70	–0,15
32	Zielona Góra	0,59	0,30	0,30
Średni poziom efektywności		0,63	0,62	–

M1 – efektywność techniczna, M2 – efektywność

Źródło: opracowanie własne.

wzorcowy poziom zarówno efektywności technicznej, jak i efektywności. Na taki wynik złożyły się dwa czynniki: konsekwentna realizacja założeń gospodarki o obiegu zamkniętym (w tym działania edukacyjne zwiększające świadomość mieszkańców w zakresie segregacji odpadów) oraz korzystny kontrakt na odbiór i utylizację odpadów podpisany z przedstawicielami miasta Bydgoszczy (Analiza stanu gospodarki odpadami... 2023).

Na podstawie histogramu (ryc. 1) można stwierdzić, że większość analizowanych JST uzyskała wskaźniki efektywności mieszczące się w przedziale 0,41–0,60



Ryc. 1. Histogram wyników efektywności technicznej i ekoefektywności w ocenianych JST

Źródło: opracowanie własne.

(M1: 14 jednostek, M2: 17 jednostek) oraz 0,61–0,80 (M1: 9 jednostek, M2: 12 jednostek). Należy zauważyć, że wartości te korespondowały z obliczonymi średnimi poziomami wskaźników (0,63 dla M1 i 0,62 dla M2).

Najbardziej zauważalne różnice między analizowanymi wskaźnikami efektywności wystąpiły w przedziałach skrajnych. Wskaźnik efektywności technicznej (M1) w przedziale 0,21–0,4 osiągnęły 3 JST, podczas gdy żadne miasto nie uzyskało takich wartości wskaźnika ekoefektywności (M2). W najwyższym przedziale (0,81–1,00) wskaźnik efektywności technicznej osiągnęło 6 JST, a wskaźnik

ekoefektywności – tylko 3 JST. To znaczne zróżnicowanie efektywności technicznej mogło wynikać z lokalnych uwarunkowań wpływających na koszty funkcjonowania systemu, takich jak dostępność instalacji przetwarzania odpadów czy gęstość zaludnienia. Natomiast rozkład ekoefektywności był bardziej skoncentrowany w przedziałach środkowych, co mogło wynikać z regulacji unijnych i krajowych nakładających na JST obowiązek osiągnięcia określonych poziomów recyklingu i przygotowania do ponownego użycia odpadów komunalnych. Realizacja tych wymogów w polskich miastach napotyka jednak istotne bariery, takie jak wyższe koszty operacyjne selektywnej zbiórki i recyklingu, niedostateczna infrastruktura przetwarzania odpadów oraz problemy z jakością segregacji odpadów przez mieszkańców. Trudności sprawiają, że osiągnięcie wymaganych poziomów recyklingu pozostaje znaczącym wyzwaniem dla polskich JST (zob. Smol i in. 2019, Jędrzak 2021).

W drugim etapie badań przeanalizowano wpływ zmiennych kontekstowych na efektywność techniczną i ekoefektywność gospodarki odpadami komunalnymi w badanych miastach.

Wyniki testu korelacji tau Kendalla przedstawiono w tabeli 3. Analiza korelacji między zmiennymi kontekstowymi a wskaźnikami efektywności gospodarowania odpadami komunalnymi ujawniła kilka istotnych zależności. Masa odpadów wytworzonych przez mieszkańców danej JST wykazała silną dodatnią korelację z efektywnością techniczną gospodarowania odpadami (0,67) (tab. 3). Taki związek mógł wynikać z wysokiego poziomu kosztów stałych funkcjonowania systemu gospodarowania odpadami w badanych miastach, ponieważ większa ilość odbieranych odpadów pozwala na lepsze wykorzystanie posiadanej infrastruktury i osiągnięcie korzyści skali. Jednocześnie zaobserwowano ujemną korelację tej zmiennej z ekoefektywnością (–0,33). Ten odwrotny związek wynikał zarówno z wyższych kosztów przetwarzania odpadów segregowanych w porównaniu do tradycyjnych metod zagospodarowania odpadów, jak i z trudności w uzyskaniu

przez JST odpowiedniej jakości selektywnie zebranych odpadów od mieszkańców, szczególnie w zabudowie wielorodzinnej charakterystycznej dla dużych miast. Wyniki te korespondowały z badaniami Llanquileo-Melgarejo i in. (2021), choć literatura przedmiotu nie jest w tym zakresie jednoznaczna (zob. Llanquileo-Melgarejo, Molinos-Senante 2021, Lo Storto 2021, Molinos-Senante i in. 2023).

Tabela 3. Wyniki testu korelacji tau Kendalla (wartość p) pomiędzy efektywnością techniczną i ekoefektywnością zmiennymi środowiskowymi

Zmienne środowiskowe	M1	M2
Masa odpadów wytworzonych przez mieszkańców	0,67*** (0,00)	-0,33*** (0,01)
Gęstość zaludnienia	-0,05 (0,67)	0,14 (0,23)
Poziom edukacji	0,07 (0,06)	0,41*** (0,00)
Wskaźnik aktywności turystycznej	0,41*** (0,00)	0,08 (0,52)

Istotność statystyczna: * (0,1) ** (0,05) *** (0,01).

M1 – efektywność techniczna, M2 – ekoefektywność.

Źródło: opracowanie własne.

Poziom edukacji mieszkańców, mierzony liczbą absolwentów szkół ponadgimnazjalnych i ponadpodstawowych przypadających na tysiąc mieszkańców, wykazał dodatnią korelację tylko z ekoefektywnością (0,41) gospodarowania odpadami komunalnymi w badanych miastach, co jest zgodne z wcześniejszymi badaniami w tym obszarze (Armijo de Vega i in. 2003, Díaz-Villavicencio i in. 2017). Zależność ta wynikała z możliwości kształtowania przez JST nawyków mieszkańców poprzez placówki oświatowe i kampanie edukacyjne, a także z lepszego zrozumienia hierarchii postępowania z odpadami przez społeczność o wyższym poziomie wykształcenia (zob. Pawul, Sobczyk 2011).

Z kolei aktywność turystyczna wykazała dodatni związek jedynie z efektywnością techniczną gospodarowania odpadami (0,41). Można to wyjaśnić dbałością władz lokalnych o atrakcyjność turystyczną miasta, która skłania samorządy do inwestowania w nowoczesną infrastrukturę gospodarowania odpadami, co przekłada się na wyższą efektywność techniczną całego systemu. Jednak problemy z właściwą segregacją odpadów wytworzonych przez turystów mogą niwelować te pozytywne efekty, co wyjaśnia brak wpływu aktywności turystycznej na ekoefektywność gospodarowania odpadami w analizowanych miastach. Uzyskane rezultaty potwierdzają wcześniejsze ustalenia Díaz-Villavicencio i in. (2017) dla gmin hiszpańskich. Natomiast odmienne wnioski przedstawili w swoich badaniach Llanquileo-Melgarejo i in. (2021), którzy w chilijskich JST zidentyfikowali negatywny związek pomiędzy turystyką a ekoefektywnością. Wynikał on z konieczności utrzymywania rozbudowanej infrastruktury dostosowanej do sezonowych wahań w produkcji odpadów komunalnych. Jednocześnie wyżej wspomniani autorzy zaobserwowali, że obniżona ekoefektywność systemów gospodarki odpadami w miejscowościach turystycznych wiązała się ze znacznym udziałem odpadów zmieszanych w strumieniu odpadów generowanych przez turystów (Llanquileo-Melgarejo i in. 2021, s. 12).

W przypadku gęstości zaludnienia badania empiryczne nie wykazały jednoznacznego związku tej zmiennej z efektywnością techniczną oraz ekoefektywnością gospodarowania odpadami komunalnymi. Z kolei w literaturze przedmiotu prezentowane są zróżnicowane wyniki, zwłaszcza w odniesieniu do efektywności technicznej (zob. Guerrini i in. 2017, Llanquileo-Melgarejo, Molinos-Senante 2021). Część badaczy identyfikowało pozytywną korelację między gęstością zaludnienia a efektywnością techniczną, argumentując, że większa koncentracja mieszkańców umożliwia osiąganie korzyści skali w procesie odbioru odpadów komunalnych (zob. Callan, Thomas 2001, Simões, Marques 2012). Jednakże inne badania wskazały na negatywny wpływ wysokiej gęstości zaludnienia na efektywność gospodarowania odpadami, co wynikało głównie z problemów logistycznych występujących w gęsto zabudowanych obszarach miejskich (zob. Worthington, Dollery 2001).

Wnioski

Analiza efektywności gospodarki odpadami komunalnymi w miastach stanowiących rdzenie miejskich obszarów funkcjonalnych w Polsce wskazała, że w ocenianych JST istnieje znaczący potencjał optymalizacji tych systemów zarówno w aspekcie ekonomicznym, jak i środowiskowym. Średni poziom wskaźników efektywności technicznej i ekoefektywności, kształtujący się na poziomie około 0,63, świadczy o możliwości obniżenia kosztów funkcjonowania systemów gospodarowania odpadów przeciętnie o 38%, przy jednoczesnym zachowaniu lub nawet podwyższeniu standardów w zakresie segregacji i recyklingu odpadów komunalnych.

Badania empiryczne pozwoliły wyodrębnić trzy kluczowe czynniki warunkujące ekoefektywność gospodarki odpadami komunalnymi w polskich miastach. Poziom edukacji mieszkańców wykazał pozytywny wpływ wyłącznie na ekoefektywność, co potwierdza kluczową rolę świadomości ekologicznej w prawidłowej segregacji odpadów i zapobieganiu ich powstawaniu. W świetle tych ustaleń JST powinny zintensyfikować działania edukacyjne zwiększające świadomość ekologiczną mieszkańców w zakresie prawidłowej segregacji odpadów i zapobiegania ich powstawaniu. Ma to kluczowe znaczenie wobec rosnących wymagań UE dotyczących poziomu recyklingu, które muszą spełnić polskie samorządy.

Drugim istotnym czynnikiem wpływającym na efektywność systemów gospodarowania odpadami była masa wytwarzanych odpadów komunalnych. Choć większa ilość odpadów pozytywnie wpłynęła na efektywność techniczną, to w przypadku ekoefektywności, łączącej aspekty ekonomiczne i środowiskowe, związek ten był negatywny. Wskazuje to na istotne problemy badanych JST z recyklingiem rosnącej masy odpadów komunalnych, wynikające z wyższych kosztów ich przetwarzania oraz niedostatecznie rozwiniętej infrastruktury. W celu poprawy ekoefektywności gospodarowania odpadami komunalnymi niezbędne jest zwiększenie w ocenianych miastach nakładów na nowoczesne instalacje do przetwarzania odpadów komunalnych. Ponadto mniejsze JST powinny rozważyć

zacieśnienie współpracy międzygminnej, która umożliwi im wykorzystanie efektów skali do optymalizacji kosztów gospodarowania odpadami.

Trzecim istotnym czynnikiem determinującym efektywność gospodarowania odpadami w ocenianych JST okazała się aktywność turystyczna. Jednostki samorządu terytorialnego o rozwiniętej funkcji turystycznej osiągnęły wyższą efektywność techniczną gospodarowania odpadami, co można wyjaśnić dbałością władz lokalnych o atrakcyjność turystyczną miasta i związanymi z tym inwestycjami w nowoczesną infrastrukturę w analizowanym obszarze. Jednak wyższa efektywność techniczna systemów gospodarowania odpadami nie wpłynęła na ich ekoefektywność, głównie ze względu na zwiększoną ilość odpadów zmieszanych generowanych przez turystów. Dlatego gminy turystyczne powinny skoncentrować się na zapewnieniu rozwiązań infrastrukturalnych ułatwiających prawidłową segregację w miejscach intensywnie wykorzystywanych turystycznie, w tym wielojęzycznego oznakowania pojemników do segregacji odpadów oraz zwiększonej liczby punktów do selektywnej ich zbiórki.

Podsumowując, analiza wskazała na konieczność kompleksowego podejścia do poprawy ekoefektywności systemów gospodarki odpadami komunalnymi w Polsce. Sukces transformacji w kierunku modelu gospodarki o obiegu zamkniętym będzie zależał od umiejętnego połączenia działań w zakresie edukacji ekologicznej, rozwoju infrastruktury technicznej oraz dostosowania rozwiązań organizacyjnych do lokalnej specyfiki.

Należy jednak podkreślić, że przeprowadzone badanie posiada pewne ograniczenia wynikające głównie z zastosowanej metodologii DEA, która ma charakter deterministyczny i pozwala jedynie na ocenę efektywności względnej badanych jednostek. Analiza danych z jednego roku uniemożliwiła ponadto obserwację dynamiki zmian ekoefektywności w czasie.

Konflikt interesów

Autorka deklaruje brak występowania konfliktu interesów. Oświadczają, że tekst artykułu jest w całości jej dziełem.

Literatura / References

- Analiza stanu gospodarki odpadami komunalnymi na terenie gminy miasta Toruń w 2023 roku. 2023. Armijo de Vega C., Ojeda-Benítez S., Ramírez-Barreto M.E. 2003. Mexican educational institutions and waste management programmes: A University case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 39(3): 283–296. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00033-8](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00033-8)
- Callan S.J., Thomas J.M. 2001. Economies of scale and scope: A cost analysis of municipal solid waste services. *Land Economics*, 77(4): 548–560. <https://doi.org/10.2307/3146940>
- Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J. (red.) 2011. *Handbook on Data Envelopment Analysis*. Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6151-8_1
- Daraio C., Di Leo S., Simar L. 2024. Viable eco-efficiency targets for waste collection communities. *Scientific Reports*, 14(1), 15038.
- Das Mercês Costa I., Dias M.F., Robaina M. 2024. Evaluation of the efficiency of urban solid waste management in Brazil by data envelopment analysis and possible variables of influence. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 6(2), 283–295. <https://doi.org/10.1007/s42768-023-00175-x>

- Delgado-Antequera L., G  mar G., Molinos-Senante M., Gómez T., Caballero R., Sala-Garrido R. 2021. Eco-efficiency assessment of municipal solid waste services: Influence of exogenous variables. *Waste Management*, 130: 136–146. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.022>
- Díaz-Villavicencio G., Didonet S.R., Dodd A. 2017. Influencing factors of eco-efficient urban waste management: Evidence from Spanish municipalities. *Journal of Cleaner Production*, 164: 1486–1496.
- Guerrini A., Carvalho P., Romano G., Marques R.C., Leardini C. 2017. Assessing efficiency drivers in municipal solid waste collection services through a non-parametric method. *Journal of Cleaner Production*, 147: 431–441.
- Huang J., Yang X., Cheng G., Wang S. 2014. A comprehensive eco-efficiency model and dynamics of regional eco-efficiency in China. *Journal of Cleaner Production*, 67: 228–238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.003>
- J  dr  czak A. 2021. Analiza kosztów gospodarki odpadami komunalnymi. Instytut Ochrony   rodowiska – Pa  stwowy Instytut Badawczy.
- Llanquileo-Melgarejo P., Molinos-Senante M. 2021. Evaluation of economies of scale in eco-efficiency of municipal waste management: An empirical approach for Chile. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(22): 28337–28348. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12529-1>
- Llanquileo-Melgarejo P., Molinos-Senante M. 2022. Assessing eco-productivity change in Chilean municipal solid waste services. *Utilities Policy*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101410>
- Llanquileo-Melgarejo P., Molinos-Senante M., Romano G., Carosi L. 2021. Evaluation of the impact of separative collection and recycling of municipal solid waste on performance: An empirical application for Chile. *Sustainability*, 13(4).
- Lo Storto C. 2021. Eco-productivity analysis of the municipal solid waste service in the Apulia region from 2010 to 2017. *Sustainability*, 13(21): 1–21. <https://doi.org/10.3390/su132112008>
- Lo Storto C. 2024. Measuring the eco-efficiency of municipal solid waste service: A fuzzy DEA model for handling missing data. *Utilities Policy*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101706>
- Lorek A. 2007. Ocena poziomu efektywno  ci gospodarki odpadami komunalnymi w Polsce i krajach UE. Prace Naukowe/Akademia Ekonomiczna w Katowicach (<http://bazekon.icm.edu.pl/bazekon/element/bwmetal.element.ekon-element-000171190659>).
- Mahlberg B., Luptacik M. 2014. Eco-efficiency and eco-productivity change over time in a multisectoral economic system. *European Journal of Operational Research*, 234(3): 885–897.
- Masternak-Janus A., Rybaczevska-B  ajejowska M. 2017. Comprehensive Regional Eco-Efficiency Analysis Based on Data Envelopment Analysis: The Case of Polish Regions. *Journal of Industrial Ecology*, 21(1): 180–190. <https://doi.org/10.1111/jiec.12393>
- Milanovi   T., Savi   G., Marti   M., Milanovi   M., Petrovi   N. 2022. Development of the waste management composite index using DEA method as circular economy indicator: The case of European Union countries. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(1): 771–784.
- Molinos-Senante M., Maziotis A., Sala-Garrido R. 2024. Estimating the eco-efficiency of urban waste services towards sustainable waste management. *Sustainable Development*, 32(5): 5677–5691. <https://doi.org/10.1002/sd.2983>
- Molinos-Senante M., Maziotis A., Sala-Garrido R., Mochol  -Arce M. 2023. Factors influencing eco-efficiency of municipal solid waste management in Chile: A double-bootstrap approach. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 41(2): 457–466. <https://doi.org/10.1177/0734242X221122514>
- Pais-Magalhães V., Moutinho V., Marques A.C. 2021. Scoring method of eco-efficiency using the DEA approach: Evidence from European waste sectors. *Environment, Development and Sustainability*, 23(7): 9726–9748. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00709-x>
- Pawul M., Sobczyk W. 2011. Edukacja ekologiczna w zakresie gospodarki odpadami jako narz  dzie realizacji zr  wnowa  zonego rozwoju. *Problemy Ekorozwoju*, 6(2): 147–156.
- Pérez-López G., Prior P., Zafra-Gómez J.L., Plata-Díaz A.M. 2016. Cost efficiency in municipal solid waste service delivery. Alternative management forms in relation to local population size. *European Journal of Operational Research*, 255: 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.05.034>
- Schaltegger S., Sturm A. 1989.   kologieinduzierte Entscheidungsprobleme des Managements: Ansatzpunkte zur Ausgestaltung von Instrumenten. *Inst. f. Betriebswirtschaft*.
- Seiford L.M., Zhu J. 2005. A response to comments on modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *European Journal of Operational Research*, 161(2): 579–581.

- Simões P., Marques R.C. 2012. On the economic performance of the waste sector. A literature review. *Journal of Environmental Management*, 106: 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.005>
- Smol M. 2022. Europejski Zielony Ład. Stan realizacji, wyzwania, nadzieje. Centrum Analiz Klubu Jagiellońskiego.
- Smol M., Kulczycka J., Czaplicka-Kotas A., Włóka D. 2019. Zarządzanie i monitorowanie gospodarki odpadami komunalnymi w Polsce w kontekście realizacji gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*.
- Śleszyński P. 2013. Delimitacja miejskich obszarów funkcjonalnych stolic województw. *Przegląd Geograficzny*, 85(2): 173–197.
- Worthington A.C., Dollery B.E. 2001. Measuring efficiency in local government: An analysis of new south wales municipalities' domestic waste management function. *Policy Studies Journal*, 29(2): 232–249. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0072.2001.tb02088.x>
- Zafra-Gómez J.L., López-Hernández A., Plata-Díaz A.M., Garrido-Rodríguez J. 2016. Financial and political factors motivating the privatisation of municipal water services. *Local Government Studies*, 42(2): 287–308. <https://doi.org/10.1080/03003930.2015.1096268>
- Zhao J., Li X., Chen L., Liu W., Wang M. 2024. Scenario analysis of the eco-efficiency for municipal solid waste management: A case study of 211 cities in western China. *Science Of The Total Environment*, 919. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170536>
- Zou J., Ding R., Zhu Y., Peng L., Jiang S. 2024. Urban eco-efficiency of China: Spatial evolution, network characteristics, and influencing factors. *Ecological Indicators*, 167: 112641.

Eco-efficiency evaluation of municipal waste management in Poland with the DEA method

Abstract: co-efficiency in local government units represents a management philosophy focused on achieving three objectives: optimizing costs of providing local public services, minimizing their environmental impact, and ensuring high quality of life for residents. This comprehensive approach to evaluating municipal waste management systems considers both the need to minimize operational costs that affect fees paid by residents, as well as the necessity to reduce the negative impact of waste on society and the environment. Despite growing interest among researchers in the concept of eco-efficiency in local government, there is a lack of comprehensive empirical research evaluating waste management systems in Poland through the lens of this concept.

In response to this research gap, this article presents the results of municipal waste management analysis conducted in 2023 in Polish cities constituting the cores of urban functional areas. The main objective of the study was to conduct a comprehensive comparative analysis of technical efficiency and eco-efficiency of waste management systems in the evaluated local government units. The research addresses challenges faced by Polish local governments related to implementing the circular economy concept and meeting obligations imposed by the European Union regarding specific municipal waste recycling targets and landfill reduction requirements. The research approach employed a two-stage methodology: first measuring technical efficiency and eco-efficiency of waste management using the data envelopment analysis (DEA) method with a non-oriented model assuming constant returns to scale, and then assessing the impact of environmental variables on the obtained efficiency indicators using Kendall's tau correlation coefficient. The average level of efficiency indicators in 2023 was approximately 0.6, indicating a significant need for improvement in the functioning of waste management systems in the evaluated cities. The empirical analysis identified the main factors determining the efficiency of municipal waste management in the evaluated Polish cities: education level of the residents, the mass of generated waste, and the tourist activity of the city. Based on the obtained results, recommendations were formulated providing practical guidelines for the decision-makers regarding the improvement of waste management systems in the examined local government units.

Keywords: municipal waste management, eco-efficiency, data envelopment analysis (DEA), local government, circular economy.