

*Maria Walery*

**ZALEŻNOŚĆ WSKAŹNIKA EKONOMICZNEJ  
EFEKTYWNOŚCI OD STOPNIA REDUKCJI ILOŚCI  
ODPADÓW W PROCESIE TERMICZNEGO  
PRZEKSZTAŁCANIA ODPADÓW MEDYCZNYCH**

---

***THE INFLUENCE OF REDUCTION OF MEDICAL WASTE  
QUANTITY ON ECONOMIC EFFICIENCY INDEX MOUNT  
IN THERMAL TRANSFORMATION PROCESS***

**Streszczenie**

Modelowanie systemów gospodarki odpadami związane jest z symulacją rzeczywistych procesów jednostkowych, składających się na funkcjonowanie gospodarki odpadami medycznymi.

W niniejszej pracy wykorzystano model optymalizacyjny systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych w wersji dynamicznej, który umożliwił projektowanie najkorzystniejszych pod względem ekonomicznym systemów gospodarki tego rodzaju odpadów.

W artykule przedstawiono analizę wpływu parametru opisującego stopień redukcji ilości odpadów medycznych w procesie termicznego przekształcania odpadów na wartość uzyskanego wskaźnika ekonomicznej efektywności na przykładzie systemu gospodarowania odpadami medycznymi w województwie podlaskim.

Zakres badań operacyjnych wykonany w ramach studium optymalizacji został podzielony na dwa kolejne etapy obliczeń optymalizacyjnych przy przyjęciu określonych parametrów technicznych i ekonomicznych, w celu ustalenia wpływu parametru wejściowego systemu, tj. stopnia redukcji ilości odpadów medycznych w procesie termicznego przekształcania odpadów na generowane rozwiązanie systemu, tj. koszt funkcjonowania systemu, wskaźnik ekonomicznej efektywności oraz strukturę przestrzenną systemu.

**Słowa kluczowe:** system gospodarki odpadami medycznymi, koszt funkcjonowania systemu, wskaźnik ekonomicznej efektywności

### Summary

*Modeling of waste management systems is related to the simulation of the actual unit processes that make up the functioning of medical waste.*

*The paper presents the model of medical waste management system in the dynamic version which allows to design the most economically effective systems of medical wastes disposal and utilization.*

*The paper presents an analysis of dependency of the parameter describing the degree of reduction of medical waste in thermal transformation process on the value of the economic efficiency index obtained from the example of medical waste management system in the province of Podlasie.*

*The range of operational research carried out within the framework of the optimization study was divided into two successive stages of optimization calculations for the adoption of specific technical and economic parameters, to determine the impact of input parameter of the system in the reduction of medical waste in the process of waste incineration system that is the generated cost of the system, the rate of economic efficiency index and the spatial structure of the system.*

**Key words:** *medical waste management system, system functioning costs, economic efficiency index*

### WSTĘP

Odpady medyczne powstające w obiektach służby zdrowia stanowią istotne zagrożenia epidemiologiczne, toksykologiczne i sanitarne. System gospodarowania odpadami medycznymi wymaga uporządkowanych rozwiązań logistycznych systemów zbiórki, transportu i unieszkodliwiania odpadów ze względu na ich potencjalne właściwości zakaźne.

Na podstawie analizy stanu istniejącego systemu gospodarowania odpadami medycznymi na obszarze woj. podlaskiego należy stwierdzić, iż wymaga on wprowadzenia wzmożonych działań oraz rozwiązań systemowych, tj. technicznych i organizacyjnych, które zagwarantują unieszkodliwienie odpadów przy jednoczesnym spełnieniu standardów ochrony środowiska i sanitarnego bezpieczeństwa. Właściwie opracowane i wdrożone procedury odnoszące się do rozwiązań logistycznych w zakresie systemów sortowania, zbiórki i transportu mogą zapewnić placówkom służby zdrowia osiągnięcie pożądanych efektów ekonomicznych jak i ekologicznych przy jednoczesnym wyeliminowaniu zagrożeń sanitarnych.

Koniecznym zatem wydaje się przeprowadzenie analizy rozwiązań systemowej gospodarki odpadami medycznymi jak również optymalizacji procesów jednostkowych i uwzględnienie wzajemnego powiązania wszystkich elementów systemu, zachodzących procesów i korelacji, składających się na funkcjonowanie przyjętych rozwiązań. Proces planowania opiera się na wielu działaniach, począwszy od wstępnego rozpoznania problemu i gromadzenia zbioru danych, a kończąc zastosowaniem badań operacyjnych do rozwiązania problemu, tj.

wyboru modelu i metody badań optymalizacji struktury systemu wywozu i unieszkodliwiania na podstawie kryterium ekonomicznego.

Celem pracy jest wskazanie efektywnej analitycznie i możliwej do praktycznego zastosowania w obecnych warunkach metody planowania systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych. Proces planowania opiera się na wielu działaniach, począwszy od wstępnego rozpoznania problemu i gromadzenia zbioru danych, a kończąc zastosowaniem badań operacyjnych do rozwiązania problemu, tj. wyboru modelu i metody badań optymalizacji struktury systemu wywozu i unieszkodliwiania na podstawie kryterium ekonomicznego.

### MATERIAŁ I METODY BADAŃ

W niniejszej pracy wykorzystano model optymalizacyjny systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów komunalnych, jak również program komputerowy będący jego implementacją. Model został zweryfikowany i zaadaptowany na potrzeby proponowanego modelu optymalizacji systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych dla regionu województwa podlaskiego.

Ogólne założenia modelu matematycznego odnoszą się do określenia m.in.:

- zbioru źródłowych obszarów gromadzenia odpadów  $I$ , przy czym każdemu obszarowi odpowiada określona powierzchnia terenu  $A_i$  ( $i \in I$ ), na której znajduje się zbiór  $Z$  źródeł powstawania odpadów,
- zbioru możliwych lokalizacji obiektów systemu  $W$ , przy czym każdej lokalizacji odpowiada określona niezbędna powierzchnia terenu  $A_w$  ( $w \in W$ ),
- zbioru  $P$ , stosowanych lub możliwych do zastosowania w określonym czasie wstępnych i końcowych procesów unieszkodliwiania odpadów,
- zbioru  $J$ , obiektów pośrednich, w których występują samodzielne lub skojarzone w ciąg technologiczny wstępne i wtórne procesy unieszkodliwiania odpadów,
- zbioru  $K$ , końcowych obiektów, w których występują procesy finalnego unieszkodliwiania odpadów lub pozostałości ze wstępnych lub wtórnych procesów przeróbki odpadów w obiektach pośrednich,
- zbioru  $T$ , tras wywozu odpadów ze źródłowych obszarów gromadzenia do obiektów oraz przewóz odpadów pomiędzy obiektami systemu.

Do rozważań optymalizacyjnych przyjęto modelowy region, tj. obszar województwa podlaskiego, który może być uznany za reprezentatywny dla innych regionów w tej części kraju. Dane wejściowe niezbędne do opisu proponowanych wariantów systemu gospodarki odpadami medycznymi zostały zebrane i opracowane w ramach przeprowadzonych badań analityczno-faktograficz-

nych. Przeprowadzone studium optymalizacyjne [Biedugnis S., Cholewiński J., 1987, 1992; Biedugnis S., Podwójci P., 1998, 1999, 2000, 2001; Biedugnis S., Podwójci P., Smolarkiewicz M., 2001, 2003] oparte na rzeczywistych danych dotyczących zarówno parametrów technicznych jak i wielkości ekonomicznych pozwala na uogólnienie uzyskanych wyników i ich implikację dla innych zbliżonych regionów.

Na terenie rozpatrywanego obszaru woj. podlaskiego, uwzględniając powyższe założenia oraz uwarunkowania środowiskowe, wytypowano do analizy 18 źródeł powstawania i gromadzenia odpadów - szpitali, cztery obiekty pośrednie - spalarnie odpadów medycznych odpowiednio w Białymstoku, Łomży, Hajnówce i Suwałkach oraz cztery obiekty końcowe zlokalizowane na terenie spalarni odpadów medycznych – składowiska do czasowego przetrzymywania odpadów poprocesowych z procesu termicznego przekształcania odpadów.

Zakres badań operacyjnych wykonany w ramach studium optymalizacji, został podzielony na kolejne etapy w celu przedstawienia możliwości zaproponowanego modelu:

Etap I – obejmował obliczenia optymalizacyjne, przy przyjęciu ustalonych w koncepcji parametrów technicznych i ekonomicznych.

Przebieg I wykonany w ramach tego etapu był jednocześnie przebiegiem porównawczym, względem którego były porównywane otrzymane rozwiązania.

Etap II – obejmował szereg dodatkowych przebiegów mających na celu ustalenie wpływu wybranych parametrów wejściowych modelu na generowane rozwiązanie (koszt funkcjonowania systemu, wskaźnik ekonomicznej efektywności E oraz strukturę przestrzenną systemu).

Parametry wejściowe, które były brane pod uwagę to odpowiednio:

- parametry ekonomiczne opisujące system (koszty jednostkowe transportu odpadów, wskaźnik inflacji i dyskonta),
- parametry ekonomiczne opisujące obiekty systemu (koszty kapitałowe i eksploatacyjne),
- wielkość redukcji odpadów medycznych w obiektach pośrednich systemu wyrażona w postaci współczynnika wyjściowego procesu – wwp [%],
- czas planowanego horyzontu czasowego t (czas trwania modelowych okresów).

Priorytetem było znalezienie najkorzystniejszego rozwiązania z punktu widzenia kryterium wskaźnika ekonomicznej efektywności, uwzględniającego zarówno dobór technologii unieszkodliwiania odpadów, jak i poszukiwanie najkorzystniejszej relacji między lokalizacją stosowanych obiektów i związaną z nimi siecią tras przewozu odpadów w zależności od ilości przewożonych odpadów w poszczególnych okresach modelowych.

Obliczenie wskaźnika ekonomicznej efektywności przeprowadzono metodą przedstawioną w pracach Biedugnisa i Cholewińskiego [Biedugnis, Cholewiński 1987, 1992], uwzględniając w modelu dynamicznym inflację i dyskonto-

wanie rocznych nakładów kapitałowych i kosztów bieżących w poszczególnych okresach modelowych jak:

- nakłady kapitałowe przedstawiają wartość rocznej raty umorzeniowej z uwzględnieniem dyskontowania i inflacji, wyrażonej w postaci części stałej nakładów kapitałowych  $F_N$  i części zmiennej  $S_N$  dla danego okresu modelowego,
- koszty bieżące przedstawiają wartość rocznych kosztów eksploatacji (bez amortyzacji środków trwałych) z uwzględnieniem dyskontowania i inflacji, wyrażonej w postaci części stałej kosztów bieżących  $F_E$  i części zmiennej  $S_E$  dla danego okresu modelowego.

## WYNIKI BADAŃ

Obliczenia zostały zrealizowane w następujących przebiegach:

Etap I - przebieg 1 – przebieg jak w koncepcji z uwzględnieniem następujących parametrów: czas trwania modelowych okresów odpowiednio  $t_1 = 5$  i  $t_2 = 15$  lat, jednostkowy koszt transportu odpadów medycznych w I i II okresie modelowym odpowiednio: 1,33 oraz 0,44 zł/t/min, wielkość redukcji odpadów medycznych w obiektach pośrednich systemu wyrażona w postaci współczynnika wyjściowego procesu wwp = 15%.

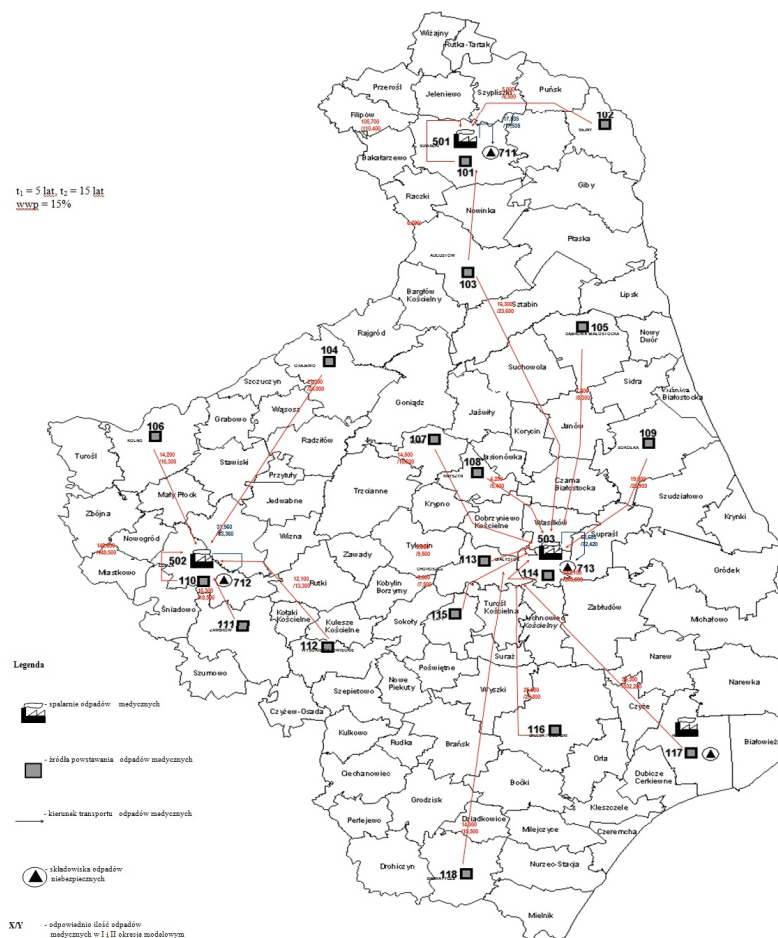
Obliczenie kosztu jednostkowego przeprowadzono metodą zaprezentowaną w pracach Biedugnis i Cholewińskiego [Biedugnis, Cholewiński 1987, 1992]. Koszt jednostkowy wywozu odpadów medycznych dla przyjętych warunków technicznych i eksploatacyjnych wynosi  $K_{ij} = 9,57$  zł, a po przeliczeniu na jednostkę wyrażającą koszt przewozu 1 tony w ciągu 1 minuty  $K_{ij(k)} = 1,33$  zł/t/min.

Etap II - w przebiegach 2-5 – badano wpływ zmiany parametru opisującego stopień redukcji ilości odpadów medycznych w procesie termicznego przekształcania odpadów, wyrażonego w postaci współczynnika wyjściowego – wwp [%] oraz dodatkowo zmiany jednostkowego kosztu transportu odpadów medycznych w I i II okresie modelowym na uzyskanie optymalnego rozwiązania.

W pracy przedstawiono dane wejściowe jedynie dla 1 przebiegu badań optymalizacyjnych. W pozostałym etapie badań operacyjnych zmianie podlegały poszczególne parametry wejściowe systemu. I tak dla przebiegu 2 – parametry jak w przebiegu 1, lecz przy założonych wwp = 15% i 10% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów medycznych w I i II okresie modelowym odpowiednio 1,46 oraz 0,48 zł/t/min; przebiegu 3 - parametry jak w przebiegu 1, lecz przy założonych wwp = 15% i 25% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów medycznych w I i II okresie modelowym odpowiednio 1,66 oraz 0,55 zł/t/min; przebiegu 4 - parametry jak w przebiegu 1, lecz przy założonych wwp = 15% i 50% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów medycznych w I i II okresie modelowym odpowiednio 2,00 oraz 0,66 zł/t/min; przebiegu 5 - parametry jak w przebiegu 1, lecz przy założonych wwp = 15%

i 100% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów medycznych w I i II okresie modelowym odpowiednio 2,66 oraz 0,88 zł/t/min.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń optymalizacyjnych dla przebiegu 1 (etap 1) z założonych wstępnie na modelowym obszarze 26 obiektów systemu (18 – źródeł powstawania odpadów medycznych, 4 – spalarnie, 4 – składowiska odpadów niebezpiecznych, 55 – możliwych tras przewozu odpadów), zostały wybrane w I i II okresie modelowym odpowiednio: 3/3 spalarnie, 3/3 składowiska oraz 21/21 tras przewozu odpadów, minimalizując w ten sposób koszt funkcjonowania systemu (rys. 1).



**Rysunek 1.** Układ lokalizacji obiektów systemu gospodarki odpadami medycznymi oraz tras transportu odpadów na obszarze modelowego regionu – przebieg I  
**Figure 1.** Object localization of medical waste management system and transportationways in modeled region – for 1 run

Dla przebiegu 1 w tabeli 1 przedstawiono poziomy działalności przerób-  
czych w obiektach pośrednich i końcowych w poszczególnych okresach mode-  
lowych.

**Tabela 1.** Poziomy działalności przerób-  
czych w obiektach pośrednich i końcowych  
w poszczególnych okresach modelowych dla przebiegu 1  
na obszarze modelowego regionu [t/rok]

**Table 1.** The level activity processing of medial and final objects for 1 run [ton/year]

Wyszczególnienie	ID	Nazwa procesu	ID	Poziomy działalności przerób- czych [t/rok]	Okres badań modelowych
Suwałki	501	spalarnia	901	116,900	I
Suwałki	501	spalarnia	901	116,900	II
Łomża	502	spalarnia	901	210,400	I
Łomża	502	spalarnia	901	222,400	II
Białystok	503	spalarnia	901	457,900	I
Białystok	503	spalarnia	901	482,799	II
Suwałki	711	składowisko	903	17,535	I
Suwałki	711	składowisko	903	17,535	II
Łomża	712	składowisko	903	31,560	I
Łomża	712	składowisko	903	33,360	II
Białystok	713	składowisko	903	68,685	I
Białystok	713	składowisko	903	72,420	II

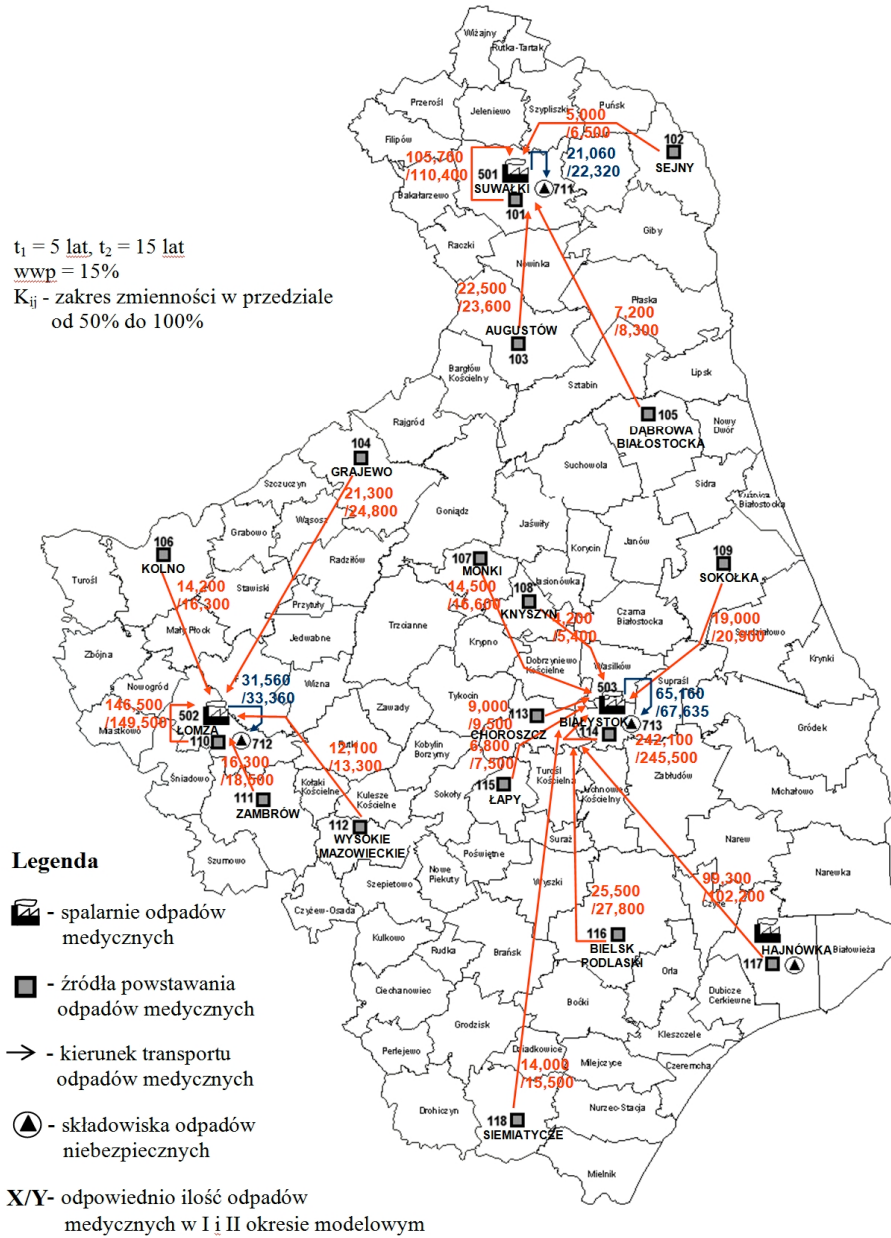
ID – numeracja obiektów odpowiednio: początkowego, pośredniego i końcowego w I i II okresie  
badań modelowych

I, II - czas trwania badań modelowych odpowiednio  $t_1 = 5$  i  $t_2 = 15$  lat

Dla przebiegów 2 i 3 przy założonych współczynniku wyjściowym  $w_{wp} = 15\%$  i 10-25% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów medycznych w I i II okresie modelowym (z 1,46 zł/t/min do 1,66 zł/t/min) – struktura przestrzenna systemu gospodarki odpadami medycznymi nie uległa zmianie w stosunku do przebiegu 1 ( $w_{wp} = 15\%$ ), nie ma też zmian dotyczących ilości transportowanych odpadów po określonych trasach przewozu, ani też zmian poziomów działalności przerób-  
czych w I i II okresie modelowym.

Wprowadzenie dodatkowego parametru wejściowego, tj. jednostkowego kosztu transportu odpadów w przedziale 10-25% spowodowało nieznaczny wzrost (o 0,3%) wskaźnika ekonomicznej efektywności E z 1622 zł/t (przebieg 1) do 1622,40 zł/t (przebieg 3).

Dla przebiegów 4 i 5 (rys. 2) przy założonych współczynniku wyjściowym  $w_{wp} = 15\%$  oraz 50-100% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów medycznych w I i II okresie modelowym (z 2,00 zł/t/min do 2,66 zł/t/min) - następowała nie tylko zmiana struktury przestrzennej systemu, ale także zmiana ilości transportowanych odpadów w I i II okresie modelowym.



**Rysunek 2.** Układ lokalizacji obiektów systemu gospodarki odpadami medycznymi oraz tras transportu odpadów na obszarze modelowego regionu – przebiegi 4, 5

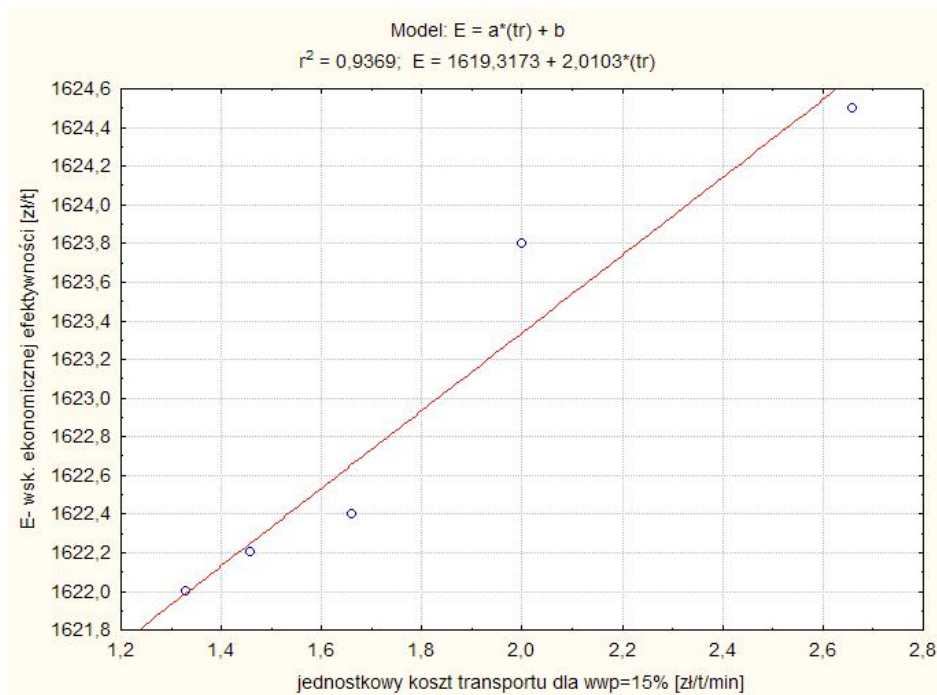
**Figure 1.** Object localization of medical waste management system and transportation ways in modeled region – for 4, 5 runs



W wyniku przeprowadzonych obliczeń optymalizacyjnych dla przebiegów 4 i 5 uzyskano nieznaczny wzrost (o 1,5‰) wartości wskaźnika ekonomicznej efektywności E przy założonych  $wwp=15\%$  oraz 50-100% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów z 1622 zł/t (przebieg 1) do 1624,50 zł/t (przebieg 5).

Na rysunku 3 przedstawiono wartość uzyskanego wskaźnika ekonomicznej efektywności E dla przebiegów 2-5 w zależności od stopnia redukcji ilości odpadów medycznych w procesie termicznego przekształcania odpadów ( $wwp = 15\%$ ) oraz 10-100% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów. Wzrostowi współczynnika  $wwp$  odpowiada wzrost ilości odpadów poprocesowych kierowanych na składowisko. Dalszą konsekwencją jest wzrost wskaźnika ekonomicznej efektywności E:

$$E(wwp) = 1619,3173 + 2,01033*(wwp) \quad [\text{zł/t}] \quad (1)$$



**Rysunek 3.** Zależność wskaźnika ekonomicznej efektywności E od stopnia redukcji ilości odpadów medycznych w procesie termicznego przekształcania odpadów oraz jednostkowego kosztu transportu odpadów

**Figure 3.** The influence of reduction of medical waste quantity on economic efficiency index in thermal transformation process and units transportation costs of medical waste

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych obliczeń optymalizacyjnych dla poszczególnych przebiegów 2-5 w zależności od przyjętych wartości parametrów wejściowych, w porównaniu z przebiegiem 1 obliczonym dla założonych w koncepcji parametrów techniczno-ekonomicznych systemu gospodarki odpadami medycznymi modelowego regionu sformułowano następujące wnioski:

1. Wzrost jednostkowego kosztu transportu odpadów z poziomu 1,33 zł/t/min do 2,66 zł/t/min nie powoduje zmiany struktury układu lokalizacji obiektów systemu oraz sieci działalności transportowych, ze względu na małą ilość transportowanych odpadów z poszczególnych źródeł powstawania odpadów zarówno w I jak i II okresie modelowym. Wzrost jednostkowego kosztu transportu odpadów o 100% powoduje nieznaczny wzrost wskaźnika ekonomicznej efektywności E. Zatem można stwierdzić, iż uzyskany obliczeniowy wariant wykazuje stabilność rozwiązania na zmianę jednostkowego kosztu transportu odpadów.

2. Struktura systemu gospodarki odpadami medycznymi, tj. układ lokalizacji obiektów oraz związana z nim sieć działalności transportowych determinowana jest w głównej mierze przez współczynnik wyjściowy procesu - wwp [%], określający stopień redukcji ilości odpadów medycznych w procesie termicznego przekształcania odpadów. Przy założonych ograniczeniach terenu w obiektach końcowych, tj. składowiskach, koniecznością staje się uzyskanie jak najmniejszego współczynnika wyjściowego procesu, poprzez wybór odpowiedniej technologii termicznego unieszkodliwiania odpadów medycznych przy uwzględnieniu aspektów technicznych, eksploatacyjnych oraz inwestycyjnych z zachowaniem standardów ochrony środowiska.

3. Uwzględnienie czynnika czasu w zaproponowanym modelu pozwala na rozpatrzenie systemu jako przedsięwzięcia inwestycyjnego, tj. zakładającego realizację systemu od podstaw, modernizacyjnego – obejmującego optymalizację procesów składowych w układzie istniejącym lub przedsięwzięcia obejmującego zarówno modernizację istniejących obiektów jak również realizację nowych rozwiązań systemowych.

Model optymalizacji systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych umożliwia analizę kosztów realizacji poszczególnych wariantów systemu gospodarki odpadami medycznymi na wybranym obszarze, poprzez wybór optymalnych rozwiązań przy minimalizacji ponoszonych kosztów eksploatacyjnych oraz nakładów inwestycyjnych i jednoczesnym spełnieniu efektu ekologicznego.

---

**BIBLIOGRAFIA**

- Biedugnis S., Cholewiński J. *Program do wyboru optymalnego wariantu gospodarki odpadami w skali regionu*, Biuletyn IGPIK nr 10, Warszawa, 1987, s. 34-39.
- Biedugnis S., Cholewiński J. *Optymalizacja gospodarki odpadami*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 1992, 340 ss.
- Biedugnis S., Podwójci P. *Modele optymalizacyjne w analizie i projektowaniu systemów wywozu i unieszkodliwiania odpadów w skali mikro- i makroregionalnej*, Mat. V Seminarium Instytutu ZWiBW Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1998, s.193-200.
- Biedugnis S., Podwójci P. *Model matematyczny systemów wywozu i unieszkodliwiania odpadów komunalnych w dobie globalnych sieci informacyjnych*, Mat.VI Seminarium Instytutu ZWiBW Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999, s. 194-203.
- Biedugnis S., Podwójci P., *Technologia unieszkodliwiania odpadów jako główny czynnik modelu decyzyjnego planowania gospodarki odpadami komunalnymi*. Mat. VII Seminarium Instytutu ZWiBW Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000, s. 251-260.
- Biedugnis S., Podwójci P. *Model optymalizacyjny systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów komunalnych w ujęciu dynamicznym*, Mat. V Ogólnopolskiej Konferencji „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”, Ustronie Morskie-Kołobrzeg, 2001, s. 117-123.
- Biedugnis S., Podwójci P., Smolarkiewicz M. *Regional optimizing Model for Systems of Municipal Waste Disposal and Utilization Model for Systems of Municipal Waste Disposal and Utilization in dynamic Contest*, Mat. XXII Międzynarodowego Sympozjum im. Bolesława Krzysztofika AQUA'2001, Płock, 2001, s. 34-39.
- Biedugnis S., Podwójci P., Smolarkiewicz M. *Optymalizacja gospodarką odpadami komunalnymi w skali mikro i makroregionalnej*, Wyd. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, 2003, 96 ss.

*Artykuł powstał w ramach realizacji pracy S/WBiIS/02/2011  
finansowanej przez KBN*

Dr inż. Maria Walery  
Katedra Systemów Inżynierii Środowiska  
Politechnika Białostocka  
ul. Wiejska 45A  
15-351 Białystok  
e-mail: m.walery@pb.edu.pl

